

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



Diplomová práce

Liberec 2009

**Filip Šír**

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N 2612 - Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 - Mechatronika

**Model mechatronického uzlu stroje**

**Model of mechatronic machine node**

.....

## **Diplomová práce**

Autor: **Filip Šír**

Vedoucí práce: Ing. Josef Černohorský, Ph.D.

V Liberci 29.5.2009

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 29.5.2007

Podpis: .....

Filip Šír

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Josefu Černohorskému, Ph.D. za poskytnutý čas, informace a důležité rady, které mi udělil v průběhu naší spolupráce.

Rovněž bych rád poděkoval rodičům především a všem, kteří mne podporovali při zpracování této diplomové práce.

Liberec, květen 2009

Autor

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá stavbou, návrhem zapojení, oživením a naprogramováním modelu jednoosé pily.

Daný model je osazen dvěma pohony firmy Maxon. Ty se skládají z řídicí jednotky a stejnosměrného motoru. Jsou propojeny sériovou linkou s počítačem, kterým můžeme dané pohony ovládat či programovat. Dále pak s ovládacím panelem, se kterým je možné s modelem pracovat i po odpojení počítače. Výše uvedený ovládací panel, přesněji návrh desky plošného spoje, je taktéž součástí této práce. Na modelu byla provedena řada měření, která jsou nezbytná pro výpočet teoretických parametrů. Ty jsou v podstatě limitní, a vymezují s naměřenými parametry oblasti použitelných dat. Ta jsou nutná pro nastavení hodnot motorů v řídicím programu. Tento program je vytvořen v softwarovém prostředí, splňujícím normu IEC 61131, které umožňuje relativně snadné programování. Kompletní model bude součástí zařízení použitých při výuce pro ukázkou použití a programování těchto jednotek v reálném životě.

V závěrečné části práce jsou shrnuty jak teoretické, tak i praktické výsledky zjištěné na modelu. Nedílnou součástí je i teoretický rozbor možné komunikace s nadřazeným programovým celkem, tedy i další možné rozšíření vytvořeného modelu.

## **Klíčová slova**

Model mechatronického uzlu stroje, motory Maxon, programování pohonů.

## **Abstract**

This diploma thesis deals with a design, a construction, reviving and a program development of a single-axle saw.

The model is fitted with two motors of Maxon motor AG. Each of them consists of a control unit and a DC motor. They are linked with a serial line to a computer which can control the motors or can be used for control units programming. The next part of the model is a control panel. With this device it is possible to control the model without connected computer. Printed circuit board design of the control panel is also included. For theoretical parameters calculating a number of measurements were required to proceed. These parameters are essentially limited and with the measured parameters define the applicable data field. It is necessary to set the right values in engines management program. This program is created in the software which is based on the IEC 61131 standard. This program allows to drive programming in a relatively easy way and it is a part of Maxon Epos Studio software. This software can indicate the current state of drives, errors and communication between drives and the computer. The complete model will be a part of equipment used in education. It can clearly show using and programming of these units in real life.

In the final part of the work there are summarized theoretical and practical results of the model testing. An integral part of theoretical analysis is also a possibility of communication with the superior program. This is necessary for a future possible extension of the model.

## **Keywords**

Model of mechatronic node of machine, Maxon motors, drives programming.

# Osnova

<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>1. Mechatronický model stroje</b>	<b>10</b>
1.1 Stejnosměrné motory	11
1.2 Řízení kartáčových stejnosměrných motorů	13
1.3 Řízení bezkartáčových stejnosměrných motorů	14
1.4 Motor A-Max	16
1.5 Motor EC-Max	16
1.6 Komunikační rozhraní	17
1.6.1 RS 232	17
1.6.2 CAN	17
1.6.3 CanOpen	18
<b>2. Ovládací panel</b>	<b>18</b>
2.1 Požadavky na ovládací panel	19
2.2 Blokové zapojení ovládacího panelu v modelu	19
<b>3. Matematický model stejnosměrného motoru</b>	<b>19</b>
3.1 Odvození modelu motoru	20
3.2 Model motoru v programu Matlab Simulink	22
3.3 PID regulátor	23
3.4 Kaskádní regulace	24
3.5 Regulační struktura Maxon	24
<b>4. Měření na modelu</b>	<b>25</b>
4.1 Měření mechanických parametrů modelu	25
4.2 Výpočet zátěžových parametrů	27
4.3 Nastavení regulátorů	33
<b>5. Porovnání teoretických a skutečných parametrů</b>	<b>33</b>
5.1 Defaultní a optimalizované nastavení PID regulátoru - MCD	33
5.2 Optimalizované nastavení PID regulátoru se zátěží – MCD	36
5.3 Defaultní nastavení PID regulátoru – A-Max	38
5.4 Optimalizované nastavení PID regulátoru se zátěží – A-Max	40
5.5 Vyhodnocení porovnání	43

<b>6. Řídící program</b>	<b>43</b>
6.1 Vývojový diagram	43
6.2 Vstupní parametry	45
6.3 Chybové stavy	45
<b>7. Zhodnocení</b>	<b>46</b>
<b>Závěr</b>	<b>47</b>
Seznam použitých zkratk	48
Seznam literatury	48
Seznam obrázků	49
Seznam tabulek	49
Seznam grafů	50
Obsah přiloženého CD	50
<i>Příloha 1 – Deska plošného spoje – Schéma ovládacího panelu</i>	51
<i>Příloha 2 – Deska plošného spoje - Ovládací panel</i>	52
<i>Příloha 3 – Seznam součástek - Ovládací panel</i>	54
<i>Příloha 4 – Technické parametry – Pohon Mcd – motor EC-Max</i>	55
<i>Příloha 5 – Technické parametry – Pohon A-max</i>	56
<i>Příloha 6 – Technické parametry - Indukční čidlo</i>	57
<i>Příloha 7 – Fotodokumentace zařízení</i>	58



## Úvod

Modelování, nebo stavba modelů zařízení se používá již dlouhou dobu, aby bylo možné ověřit vlastnosti nějakého zařízení, jeho funkčnost, případně vliv na okolí, a to samozřejmě za mnohem nižší náklady, než by byla vlastní výroba daného zařízení ve skutečné velikosti, a možné úpravy, které by si zjištěné parametry vyžádaly. Tak jsem se rozhodl, že si za téma svojí diplomové práce zvolím stavbu mechatronického uzlu stroje.

Tímto uzlem je myšlen model jednoosé pily, která je tvořena mechanickou částí, již tato práce neřeší, dále zapojením jednotlivých pohonů společně s ovládacím panelem, a naprogramováním řídicích jednotek pohonů. Za pohon je v této práci považováno spojení stejnosměrného motoru Maxon s řídicí jednotkou. Oba pohony, kterými je pila osazena, jsou zapojeny na sběrnici CAN a po sériové lince spojeny s počítačem. Je možné je ovládat pomocí počítače, a je-li do řídicí jednotky nahrán program, tak skrze ovládací panel i po odpojení od PC. Zmíněný ovládací panel, resp. návrh desky plošného spoje, je taktéž součástí práce. Řídicí program je vytvořen v prostředí IEC 61131, které umožňuje uživatelsky přívětivé programování pohonů. Toto prostředí je součástí programu Maxon Epos Studio, ve kterém je možné jednotlivé pohony nejenom ovládat, ale také přehledně zobrazuje aktuální stavy těchto pohonů, včetně vzájemné komunikace mezi nimi a PC.

Na hotovém zařízení je třeba provést měření, z jejichž výsledků bude možné odvodit potřebné parametry pro nastavení jednotlivých pohonů, a tedy optimálního nastavení celého modelu. Také bude možné z těchto měření na jednotlivých motorech a mechanických parametrech celého modelu možné sestavit model motorů v programu Matlab, nastavit v něm potřebné parametry a nasimulovat reakce motorů, které bude možné porovnat se skutečnými měřeními.

Kompletní model se stane součástí sady zařízení použitých pro prezentaci simulace, modelování a programování takovýchto modelů v reálném životě.

## 1 Mechatronický model stroje

Jak již bylo uvedeno v úvodu, jedná se o model stroje jednoosé pily. Předobrazem tohoto modelu je pila pro řezání textilních prefabrikátů. Tvorbu tohoto stroje je možné z hlediska návrhu rozdělit do dvou okruhů. Prvním okruhem je vlastní mechanická stavba stroje. Ta zahrnuje celou konstrukci, vlastní podobu i umístění pohonů na konstrukci. Tato část návrhu modelu stroje však není v této práci řešena, neboť tato mechanická část zařízení byla již vyrobena.

Druhým okruhem stavby modelu, kterým se zde zabývám, je vlastní zapojení pohonů, jejich vzájemným propojením a připojením k počítači. Dále pak návrhem a realizací ovládacího panelu, a naprogramováním řídicího softwaru.

Model pily je osazen dvěma stejnosměrnými motory od firmy Maxon. Pro pohon „kotouče“ je použit motor z řady A-Max o průměru 22mm. K němu je pro snímání otáček připojen encoder. Celý pohon je připojen k řídicí jednotce Epos 24/1. Ta je pomocí CAN sběrnice připojena na druhý, hlavní pohon, kterým je Maxon MCD Epos P 60W. Jedná se o kompaktní zapojení pohonu. Je v něm implementován jak motor EC-Max, tak snímač polohy natočení hřídele, tak i řídicí jednotka Epos P.

Celý model je uspořádán tak, že MCD pohon umožňuje pohyb v jedné ose, a to od krajní polohy, která je zajištěna koncovým spínačem. V našem případě se jedná o indukční čidlo, které je zapojeno jako jeden ze vstupů MCD pohonu. Druhý konec není zajištěn žádným prvkem, protože známe délku dráhy převedenou na polohu natočení hřídele motoru.

Jelikož řídicí jednotka Epos 24/1 není programovatelná, je zařazena jako slave prvek pod MCD pohon. MCD pohon je pomocí sériové linky RS 232 a redukce připojen k USB slotu na počítači.

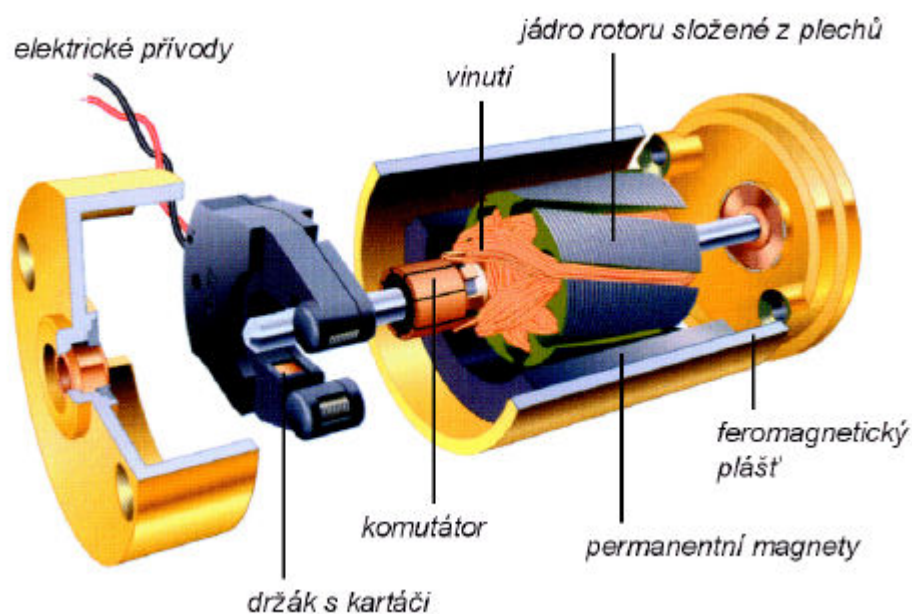
Oba pohony jsou na napájecí napětí připojeny přes ovládací panel. Ten také umožňuje ovládání celého modelu. V případě, že je v pohonu MCD nahrán řídicí program, je možné model řídit i po odpojení od počítače, právě díky ovládacímu panelu, na který jsou připojeny digitální i analogové vstupy obou pohonů.

## 1.1 Stejnosměrné motory

Jak již bylo napsáno výše, je model pily osazen dvěma motory Maxon. Jedním, který ovládá posuv v ose a je nadřazen druhému motoru, který otáčí kotoučem. Oba tyto motory jsou stejnosměrné.

Stejnosměrné motory se donedávna používaly ve většině aplikací. Jedná se o snadno říditelný motor, u kterého je možné regulovat otáčky pouhou změnou napětí na vstupu. Na statoru motoru jsou umístěny permanentní magnety, nebo budící vinutí, přičemž existuje sériové a derivační zapojení těchto vinutí. V sériovém zapojení má motor při rozběhu velký krouticí moment, čehož se převážně využívá u trakčních vedení. Motory s permanentními magnety se používají pro nižší výkony.

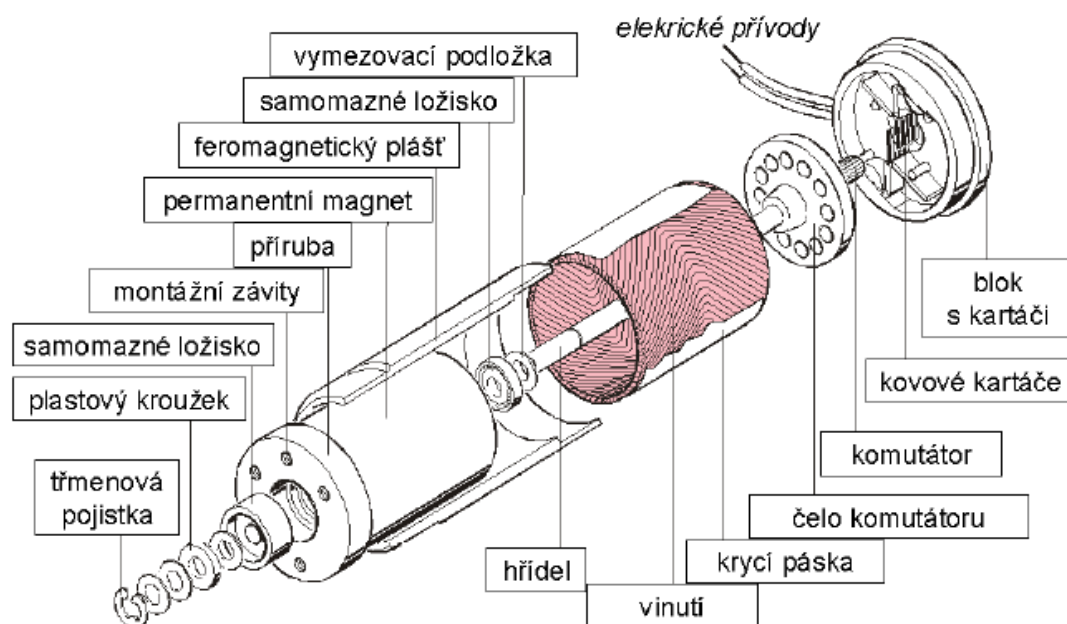
Základem stejnosměrného motoru je komutátor, což je v podstatě mechanický přepínač. Proud je na komutátor přiváděn přes grafitové kartáče, případně kovové. Kovové jsou používány u motorů s rovnoměrným chodem, a grafitové pro nekonstantní zatížení. Problémem je, že tyto části jsou tlačeny na komutátor, který se otáčí značnou rychlostí. Nehledě na fakt, že při přepínání větších proudů dochází k jiskření, tedy elektromagnetickému rušení. Z výše uvedeného vyplývá, že komutátor a kontaktní součásti motoru vyžadují pravidelnou kontrolu a údržbu. Opatření těchto součástí je také důvodem relativně krátké doby životnosti takového motoru, pokud nejsou kartáče vyměnitelné a komutátor udržovatelný.



Obr. 1- Klasický stejnosměrný motor – obrázek převzato z [3]

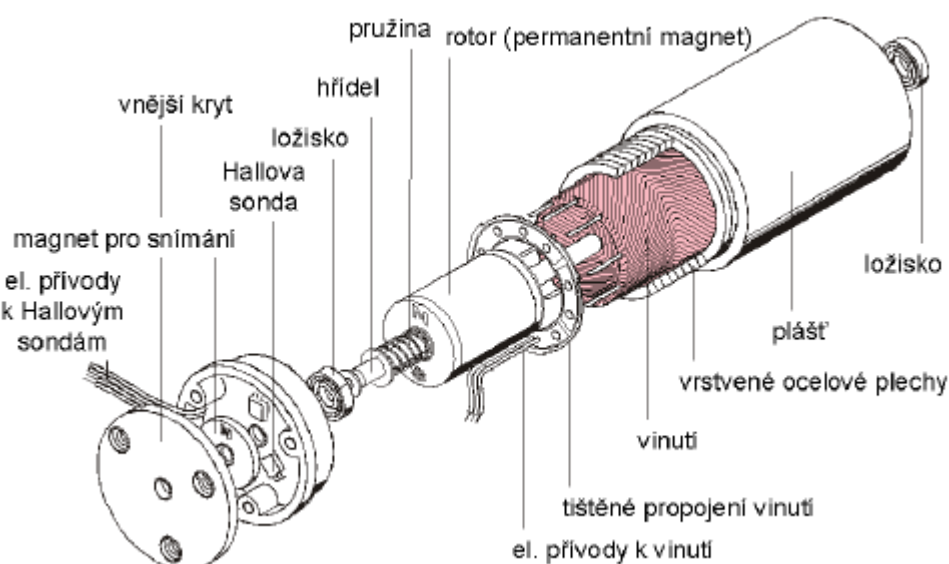
Klasické uspořádání stejnosměrného motoru, viz obrázek 1, má řadu nedostatků. Vzhledem k tomu, že rotor je složen z plechů o relativně velké hmotnosti, je moment setrvačnosti nezanedbatelným omezením, které významně zhoršuje dynamické parametry takovýchto motorů. Zároveň při přepojení z jednoho vinutí na druhé, při přechodu komutátoru z jednoho segmentu na druhý, zaniká elektromagnetické pole, a vytváří se proud, který se projevuje jako jiskření mezi odepínaným segmentem a kartáčem. Tento proud je výrazně posílen díky energii uložené v železném rotoru. Životnost komutátoru je tak vlastně zkrácena na dobu, při níž dojde k opálení kartáčů a hran segmentů komutátoru [3].

Jako jedno z možných řešení vyvinula firma Maxon samonosné vinutí bez železného rotoru a permanentním magnetem uvnitř rotoru. Toto řešení, obr. 2, poskytuje mnohem lepší technické parametry a významně prodlužuje životnost motoru. Jelikož rotor neobsahuje žádné železné prvky, tak je výrazně snížena hodnota momentu setrvačnosti. Zároveň je díky tomu potlačeno jiskření. Jako další zlepšující prvek je použití kovových kartáčů, umístění kondenzátorů mezi jednotlivé segmenty komutátoru, a v neposlední řadě snížení průměru komutátoru, což vede ke snížení obvodové rychlosti. Veškerá tato vylepšení prodlouží dobu životnosti motoru až k době životnosti samomazných ložisek. Jelikož byl permanentní magnet přesunut dovnitř rotoru, došlo zároveň ke zmenšení rozměrů a hmotnosti takového motoru, vzhledem k výkonově stejnému motoru konvenční konstrukce.



Obr. 2 - Stejnosměrný motor Maxon se samonosným vinutím – převzato z [3]

Přes veškerá technická vylepšení, která motor se samonosným vinutím přináší, neodstraňuje základní problém, a to je komutátor. Ten odstraňuje bezkartáčová konstrukce s elektronickou komutací. Pro odstranění komutátoru je třeba přesunout vinutí do statoru, aby bylo možné jeho napájení. Z toho také vyplývá, že rotor musí být tvořen permanentním magnetem. Další problém je, že pro řízení je potřeba znát polohu natočení hřídele, aby bylo možné zjistit, který segment vinutí je třeba sepnout. Segment je spínán elektronicky, podle signálu z Hallových sond, které reagují na zmagnetizovaný disk, který je umístěn na rotoru. Správným spínáním je zajištěno, že magnetické pole statoru má stále správný úhel, vzhledem k magnetickému poli rotoru. Životnost takového motoru je dána životností samomazných ložisek, v případě kuličkových ložisek spíše životností konstrukce, a nikoliv životností komutátoru. Uspořádání stejnosměrného motoru s elektronickou komutací je na obrázku 3.



Obr. 3 - Stejnosměrný motor Maxon s elektronickou komutací – převzato z [3]

## 1.2 Řízení kartáčových stejnosměrných motorů

Použití stejnosměrných motorů vyplývá nejen z jejich relativně jednoduché konstrukce, možnosti značné přetížitelnosti, ale hlavně také kvůli jednoduchosti jejich řízení. Díky komutátoru není potřeba žádné elektroniky, která by obstarávala řízení, v tomto případě jsou výstupní otáčky závislé pouze na vstupním napětí.

Otáčky jsou lineárně závislé na vstupním napětí dle vzorce:

$$n = k_n \cdot U_{vst} \quad (1.2.1)$$

$n$  - otáčky hřídele [ot/min ]

$k_n$  – rychlostní konstanta [ot/V]

$U_{vst}$  – napájecí napětí [V]

Moment, který je k dispozici na hřídeli je také lineárně závislý, a to na dodávaném proudu, dle vzorce

$$M = k_M \cdot I_{vst} \quad (1.2.2)$$

$M$  - moment na hřídeli [Nm ]

$k_M$  – momentová konstanta [Nm/A]

$I_{vst}$  – proud ve vinutí [A]

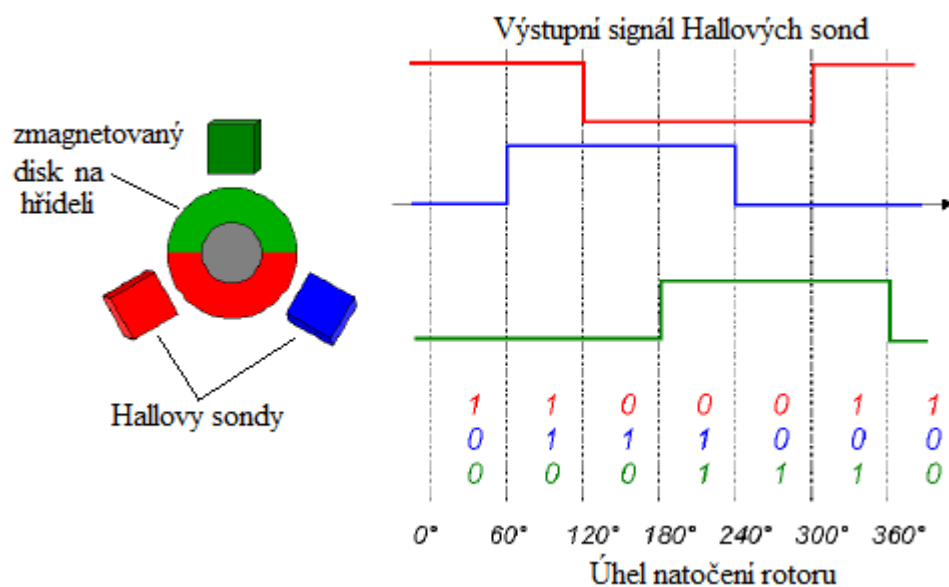
### ***1.3 Řízení bezkartáčových stejnosměrných motorů***

Jak bylo řečeno v kapitole 1.1, je pro řízení elektronicky komutovaných motorů nutná znalost úhlu natočení hřídele. Pro její zjištění se používá Hallových sond. Dále je potřebná řídicí jednotka, která spínáním správných vinutí zajistí optimální úhel mezi magnetickým polem statoru a magnetickým polem rotoru, právě na základě znalosti úhlu natočení hřídele. Statorové vinutí je rozděleno na tři segmenty, které jsou podle úhlu natočení postupně napájeny proudem. Schematické zapojení Hallových sond je na obr. 4. Vinutí je možné napájet buď obdélníkovým průběhem proudu, nebo sinusovým.

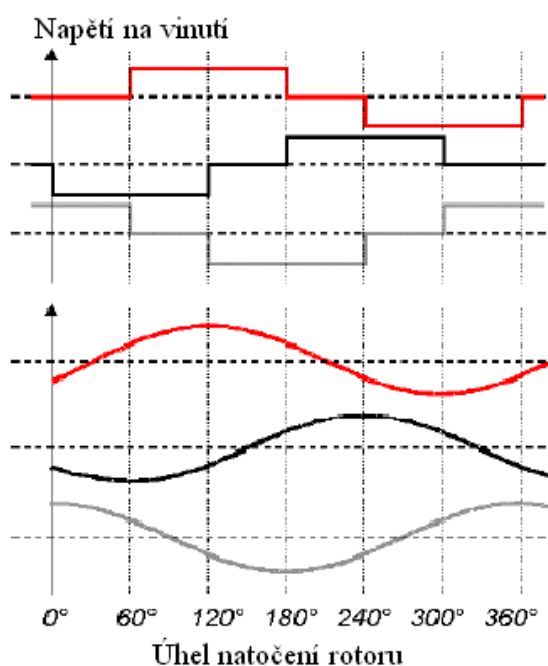
Jednodušší řídicí jednotky používají obdélníkový průběh. Nevýhodou je však sepnutí správného vinutí 30° před optimální polohou vzhledem k rotoru, a 30° za optimální polohou. Důsledkem toho je kolísání momentu o přibližně 14%.

Složitější řídicí jednotky používají sinusový průběh. Tento průběh odstraňuje zvlnění momentu. Pro správnou funkčnost je však potřebné znát přesnou polohu natočení hřídele. Proto je nutné nahrazení Hallových sond inkrementálním snímačem,

nebo resolverem. Sinusový i obdélníkový průběh napájecího napětí je znázorněn na obr. 5.



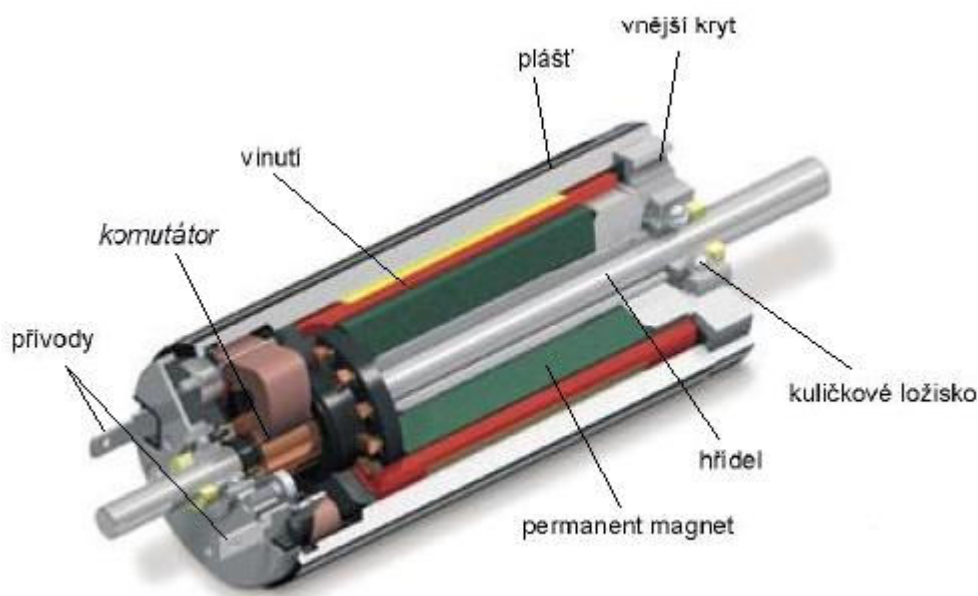
Obr. 4 – Průběh signálu z Hallových sond – převzato z [3]



Obr. 5 – Obdélníkový a sinusový průběh napájecího napětí – převzato z [3]

### ***1.4 Motor A-max***

Motor použitý pro pohon kotouče pily je z řady Maxon A-max. Jedná se o motor s průměrem 22mm. Jmenovitý výkon je 6W, napájecí napětí 24V. K němu je připojen encoder s 500 pulsy na otáčku, který umožňuje přesné měření rychlosti v obou směrech.

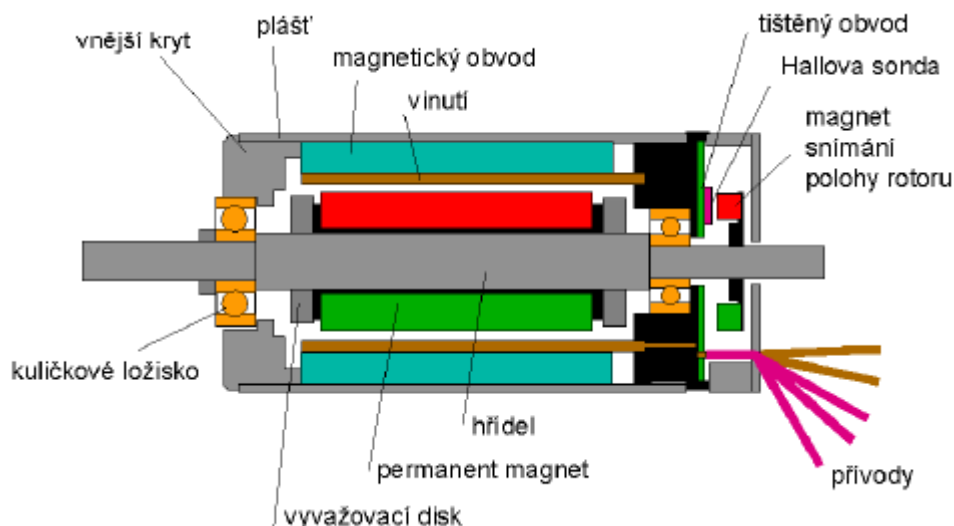


Obr. 6 - Řez motorem Maxon A-Max – převzato z [3]

### ***1.5 Motor EC-max***

Motor použitý pro polohování pohonu kotouče. Zde se jedná o elektronicky komutovaný motor o průměru 30mm, s maximálním napájecím napětím 48V, přičemž jmenovitý výkon je 60W. Na něm je připojen snímač s Hallovými sondami a inkrementálním snímačem. Motor je společně s programovatelnou řídicí jednotkou Epos P implementován do pohonu Maxon MCD. Řez motorem EC-Max je na obrázku 7.





Obr. 7 - Řez elektronicky komutovaným motorem Maxon EC-Max – převzato z [3]

## 1.6 Komunikační rozhraní

Jak již bylo řečeno výše, tak v celém uzlu stroje probíhá komunikace pomocí sériového rozhraní RS 232, dále pak po sběrnici CAN a pomocí protokolu CANOpen. Ovládání modelu uzlu stroje je vytvořeno připojením digitálních vstupů MCD pohonu na ovládací panel.

### 1.6.1 RS232

Jedná se o komunikaci pocházející z konce 60.tých let 20. století. Je definována jako sériová komunikace mezi dvěma zařízeními. Data jsou posílána za sebou v rámci jednoho datového rámce. Každé vysílání musí začít start bitem, po němž následuje 8 datových bitů, dále paritním bitem pro kontrolu správnosti přenosu. Celý přenos je ukončen jedním, nebo více stop bity. Základní uspořádání potřebuje ke správné funkci 3 vodiče. Vysílacím signálem TXD, přijímacím RXD a společnou zemí GND.

### 1.6.2 CAN

Jde o sériovou multiplexní komunikaci, která je schopna dosáhnout vysoké přenosové rychlosti, a zároveň má vysoký stupeň zabezpečení přenosu dat. Ke správnému připojení je třeba tří vodičů: CAN\_H, CAN\_L, GND. Stěžejním bodem je kromě rychlosti přenosu právě chybová odolnost. Ta se zajišťuje pomocí

monitorování sběrnice, kontrolou cyklickým kódem, kontrolou cyklických bitů a kontrolními zprávami. Kontrolní místa tak sledují komunikaci, a dle její povahy zajišťují její přerušení, opakování zprávy, případné generování chybového kódu. Jelikož se jedná o komunikaci mezi více zařízeními, je třeba určit cílové zařízení v síti, pro něž je zpráva určena. Toho se dosáhne tím, že každá zpráva nese informaci o adresátovi, datovou informaci a chybovou informaci.[8]

### ***1.6.3 CANOpen***

Je vyšší komunikační protokol pro sběrnici CAN. Umožňuje přímý přístup k parametrům, přenos časově kritických parametrů, síťové služby NMT, synchronizaci zařízení SYNC, chybová hlášení EMERGENCY, přenos řídicích dat PDO a poskytuje množství servisních nastavení v rámci SDO. Protokol CanOpen definuje všechny komunikační objekty v síti, a zařazuje je do Object Dictionary (OD).

Každý komunikační objekt je dostupný pomocí SDO. Jedná se o objekty nesoucí servisní data. SDO umožňují číst a zapisovat informace do OD. Tyto informace mohou mít libovolnou délku. Pokud je však informace delší než 4 byty, rozdělí se zpráva do SDO segmentů (CAN Framy). Informace kratší než 4 byty se nemusí segmentovat a probíhají v tzv. zrychleném přenosu. Všechny objekty v OD jsou dostupné pomocí zrychleného přenosu. Výjimku tvoří data ze záznamového bufferu.

PDO se používá pro rychlý přenos dat s vysokou prioritou. Může obsahovat maximálně 8 bytů dat, která mohou být speciálně sestavena. PDO musí mít unikátní identifikátor a může být vyslán pouze jediným zařízením v síti, ale přijat může být libovolným počtem zařízení. PDO navazuje na strukturu master/slave, což vyžaduje, aby v síti byl jeden objekt plnící funkci NMT masteru, ostatní objekty musí být NMT slave.[7]

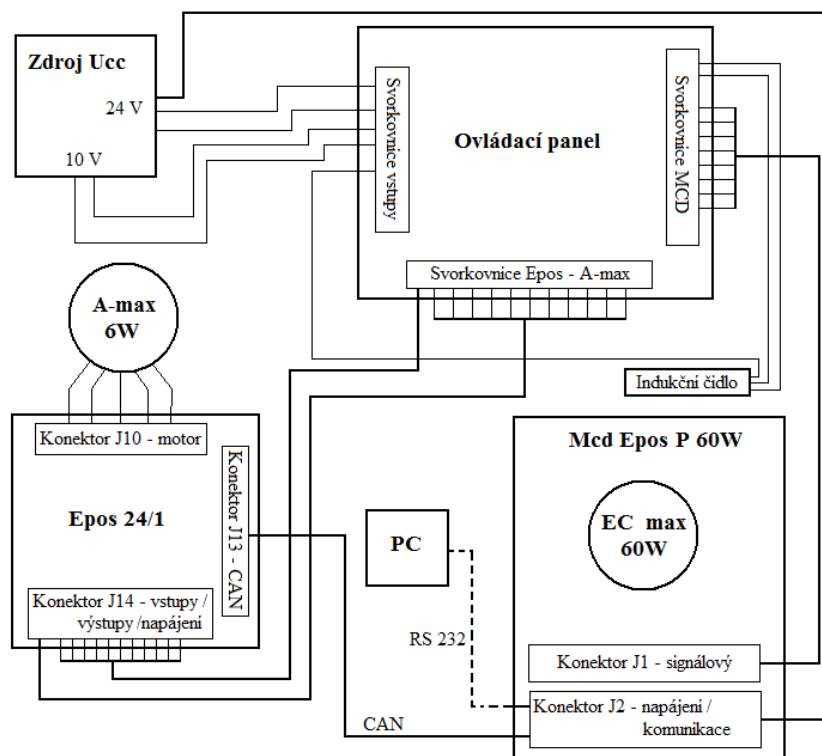
## **2 Ovládací panel**

Ovládací panel je zařízení, které propojuje oba pohony. Umožňuje jejich ovládání i po odpojení od počítače, a pomocí tlačítek a potenciometrů dodává řídicí signály na jednotlivé vstupy obou pohonů.

## 2.1 Požadavky na ovládací panel

- Zajistit minimální univerzálnost s dalšími zařízeními
- Opticky oddělit digitální vstupy pro Epos – A-max
- Optické oddělovače umístit do DIL patice
- Výstupní napětí 24V
- Použít extra svorky pro napájení oddělovačů
- Použít tlačítka pro ovládání digitálních vstupů
- Použít potenciometry pro nastavení hodnoty analogového signálu
- Oddělit svorky pro jednotlivé pohony

## 2.2 Blokové zapojení ovládacího panelu v modelu

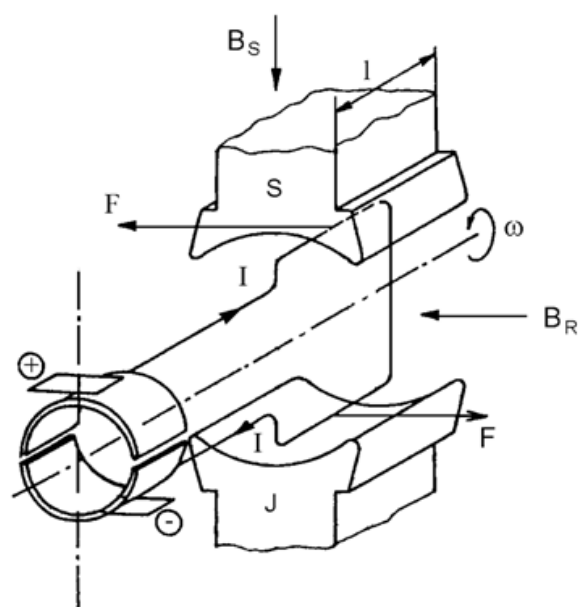


Obr. 8 - Blokové schéma zapojení ovládacího panelu

## 3 Matematický model stejnosměrného motoru

Aby bylo možné porovnat naměřené a teoretické chování stejnosměrného motoru, je potřeba si nejprve odvodit matematický popis stejnosměrného motoru. Díky jednoduchosti konstrukce motoru je možné si i se znalostí základních

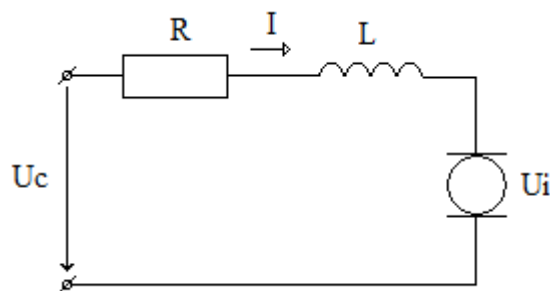
fyzikálních principů odvodit funkční schéma motoru. Jelikož se v podstatě jedná o vodič protékáný proudem  $I$  v magnetickém poli  $B_s$ , působí na něj síla  $F$ . Ta je dána jakou součin magnetického pole, proudu protékajícího vodičem a délkou vodiče v magnetickém poli  $l$ . Průchodem proudu dochází ke generování magnetického pole rotoru  $B_r$ . Maximálního momentu je dosaženo, jsou-li směry magnetického pole statoru  $B_s$  a magnetického pole rotoru  $B_r$  kolmé. Díky silám  $F$  dochází k otáčení smyčky v magnetickém poli  $B_s$ , až do okamžiku, kdy jsou  $B_s$  a  $B_r$  téměř rovnoběžné. V této chvíli ovšem dojde k posunu segmentů na komutátoru, čímž dojde k obrácení směru toku proudu. Síly  $F$  obrátí směr svého působení, avšak díky dostatečné rotační energii smyčky dojde k přechodu přes mezní polohu a k pokračování v započatém směru otáčení. Principiální schéma motoru je zobrazeno na obr. 9.



Obr. 9 - Principiální schéma motoru – převzato z [9]

### 3.1 Odvození modelu motoru

Aby bylo možné sestavit matematický model, je nejprve nutné si nakreslit náhradní schéma motoru, obr. 10. Z principiálního schématu na obr. 9, je vidět, že vstupními parametry musí být napájecí napětí, dále pak odpor vinutí, a jelikož se jedná o smyčku protékanou proudem, tak také indukčnost. Posledním parametrem je indukované napětí ve smyčce.



Obr. 10 - Náhradní schéma motoru

Z náhradního schématu je jasné vidět, že sestavujeme rovnici napěťové rovnováhy.

$$U_c = U_R + U_L + U_i \quad (3.1.1)$$

Přičemž napětí na rezistoru se spočte jako součin odporu  $R$  a hodnoty procházejícího proudu  $I$ .

$$U_R = R \cdot I \quad (3.1.2)$$

Napětí na cívce je dáno indukčností cívky  $L$ , a změnou procházejícího proudu v čase.

$$U_L = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (3.1.3)$$

Použijeme-li již známé parametry dosazením do rovnice (3.1.1), dostaneme:

$$U_c = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} + U_i \quad (3.1.4)$$

V rovnici nám již chybí jen člen s indukovaným napětím, jak již bylo řečeno v kapitole 1.2 Řízení kartáčových stejnosměrných motorů, je závislost otáček na napětí lineární funkcí, a to takovou, že:

$$U_i = C_{ss} \cdot \Phi \cdot \omega \quad (3.1.5)$$

Přičemž  $C_{ss}$  je konstantou stejnosměrného stroje a  $\Phi$  magnetickým tokem.  $\omega$  je samozřejmě úhlová rychlost. Dosazením do (3.1.4) dostaneme výslednou napěťovou rovnici.

$$U_c = R.I + L.\frac{dI}{dt} + C_{ss}.\Phi.\omega \quad (3.1.6)$$

Abychom mohli model dokončit, je potřeba sestavit ještě jednu rovnici, a to rovnici momentovou. V ní je zahrnut fakt, že celkový moment dodávaný motorem musí být roven součtu celkového zatěžujícího momentu  $M_z$  a momentu dynamického  $M_d$ .

$$M_c = M_d + M_z \quad (3.1.7)$$

Závislost pro výpočet dynamického momentu, je:

$$M_d = \frac{d(J.\omega)}{dt} \quad (3.1.8)$$

Protože je v tomto vzorci zahrnuta možnost změny momentu setrvačnosti  $J$ , která však na modelu pily není relevantním faktorem, považujeme moment setrvačnosti za konstantní. Tento předpoklad je znám jako D’Alambertův princip. Dosadíme-li  $J=\text{konst}$  do (3.1.8), pak

$$M_d = J.\frac{d\omega}{dt} \quad (3.1.9)$$

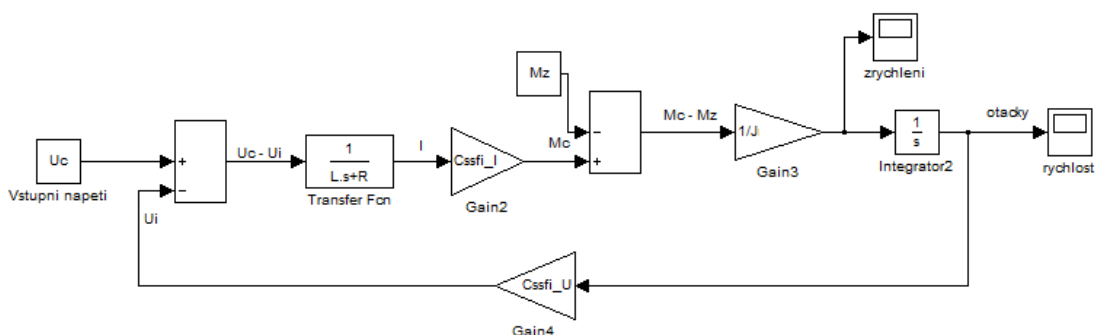
Výsledný vztah vznikne dosazením (3.1.9) do rovnice rovnováhy momentů (3.1.7).

$$M_d = J.\frac{d\omega}{dt} = M_c - M_z \quad (3.1.10)$$

Nyní máme dispozici veškeré podklady pro tvorbu matematického modelu motoru v prostředí Simulink v programu Matlab.

### ***3.2 Model motoru v programu Matlab Simulink***

Z odvozených rovnic je zřejmé, že potřebujeme údaje o motoru. Všechny tyto parametry by měli být uvedeny v katalogovém listě motoru.



Obr. 11 - Model motoru v Matlabu

### 3.3 PID regulátor

Nejčastěji používaným regulátorem je regulátor typu PID (proporcionálně integračně derivační regulátor), jehož vstupem je regulační odchylka a výstup tvoří vážený součet z regulační odchylky, jejího integrálu a derivace.[4] Rovnice PID regulátoru, kde výstupem je akční veličina, vypadá následovně:

$$u(t) = K_r \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.2.1)$$

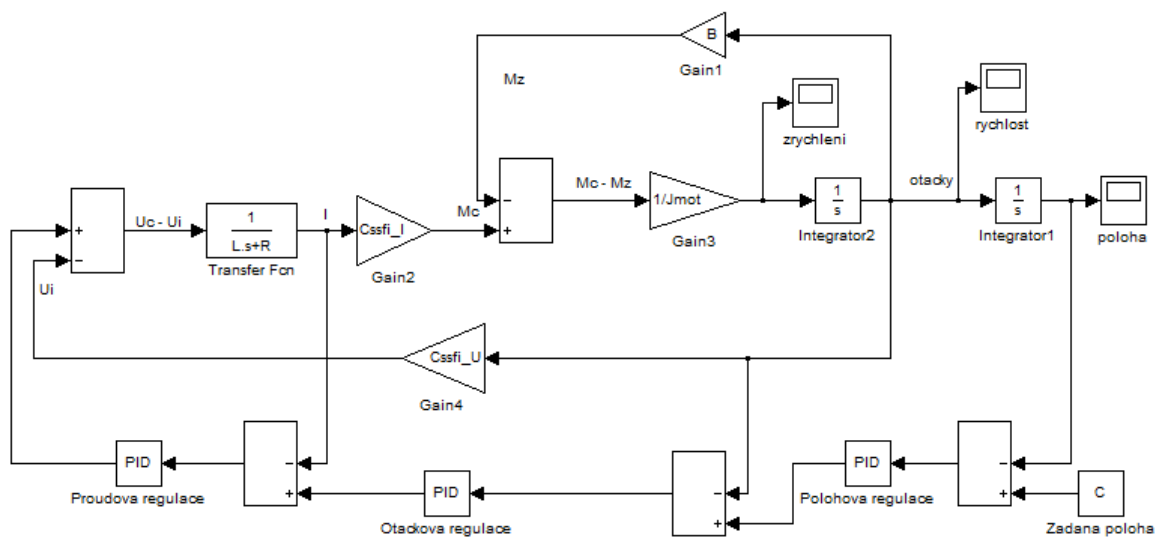
V této rovnici je  $K_r$  proporcionální zesílení všech složek,  $T_i$  integrační časová konstanta a  $T_d$  derivační časová konstanta. Pro nastavení regulátoru v simulačním programu je však výhodnější použít rovnici, kde je  $K_r$  nahrazeno  $r_0$ , ve smyslu proporcionálního zesílení. Poté je  $\frac{K_r}{T_i}$  nahrazeno  $r_1$ , a  $K_r \cdot T_d$  se rovná  $r_2$ . Výsledná rovnice je pak ve tvaru:

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \int_0^t e(\tau) d\tau + r_2 \frac{de(t)}{dt} \quad (3.2.2)$$

Proporcionální zesílení  $r_0$ , jsou li ostatní parametry rovné nule, je schopné regulace, avšak za cenu trvalé regulační odchylky. Pro její odstranění je potřeba zvolit alespoň minimální proporcionální integrační zesílení  $r_1$ . Obě tyto složky mají vliv na regulační odchylku. Poslední proporcionální derivační zesílení  $r_2$  má vliv na dynamiku chování soustavy při přechodovém ději.

### 3.4 Kaskádní regulace

Kaskádní regulace je takové zapojení regulační struktury, že dochází k regulaci proudu, otáček, i polohy daného motoru. Nejnižším stupněm je proudový regulátor, kterému je nadřazen otáčkový regulátor a tomu polohový regulátor. Proudový a otáčkový regulátor jsou typu PI, jenom polohový regulátor je typu PID. Zapojení motoru a kaskádní regulace je zobrazeno na obr. 12.

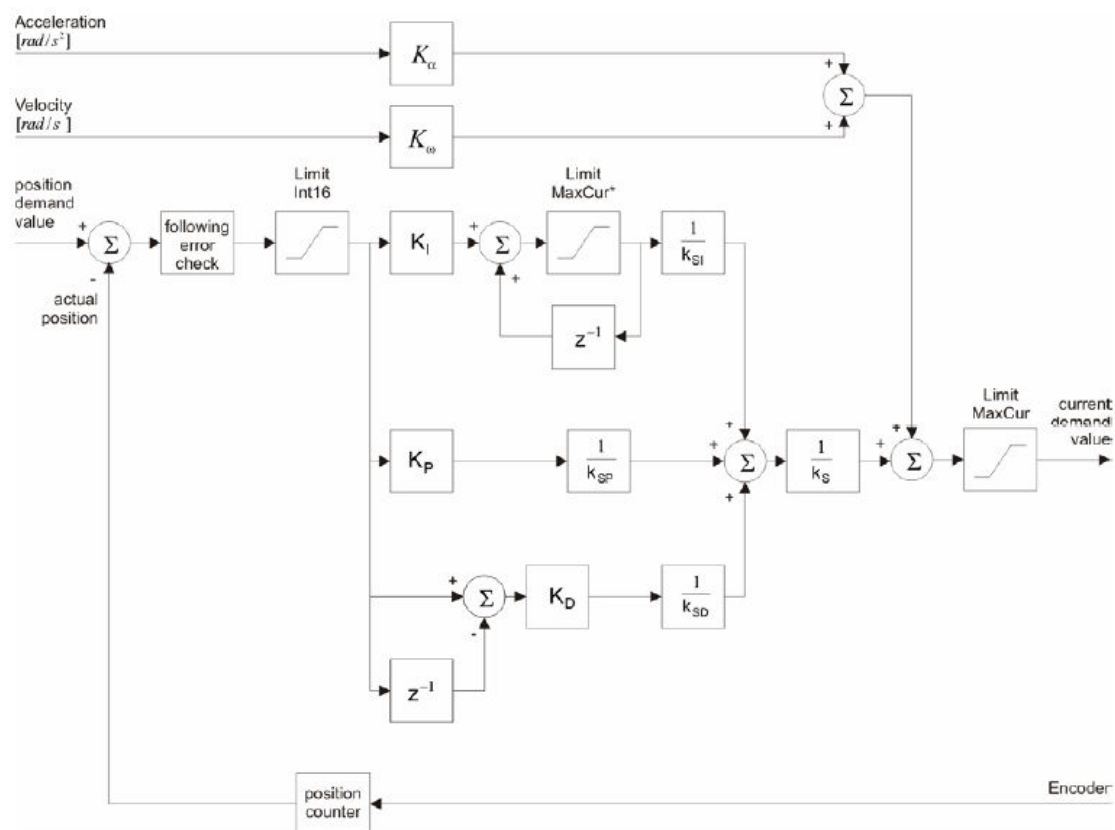


Obr. 12 - Zapojení kaskádní regulační struktury

### 3.5 Regulační struktura Maxon

Výše uvedená kaskádní regulační struktura však samozřejmě není jedinou regulační strukturou. Je však nejobvyklejší, a proto jsem ji použil k namodelování a porovnání odezev motoru. Existují i další regulační struktury, včetně struktur určených pro speciální účely. Ovšem v řídicích jednotkách Epos je implementována speciální struktura, která byla vyvinuta společností Maxon. Tato struktura je zobrazena na obr. 13. Obsahuje volitelné parametry, které závisí na zvoleném typu motoru. Další volitelné parametry se nastavují podle dané situace. V této struktuře je možné nastavit požadovanou rychlost otáček rotoru, a také hodnotu zrychlení.





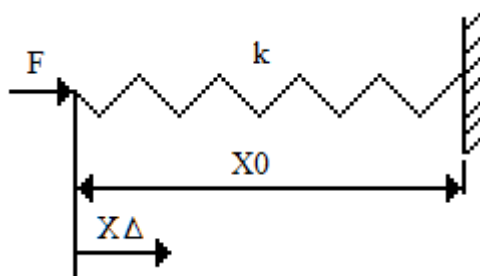
Obr. 13 - Regulační struktura Maxon - převzato z [10]

## 4 Měření na modelu

Aby bylo možné namodelovat pohony v programu Matlab, je nutné zjistit několik potřebných parametrů. Jedná se především o rozměry součástí, jimiž pohony otáčí, pro výpočet momentů setrvačností. Dále pak o zjištění tuhosti pružiny, která napíná vodící lanko a zatěžovací moment, který je odvozen ze zátěže, kterou má pohon pohybovat.

### 4.1 Měření mechanických parametrů modelu

Pro zjištění tuhosti pružiny jsem použil siloměr, a odečítal jednotlivé zkrácení délky pružiny, společně s nutnou silou. Pro výpočet je nutné znát délku pružiny v klidu, zapsanou jako  $x_0$ . Celá situace je zevrubně zobrazena na obrázku. Výsledky jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 14 - Schéma měření tuhosti pružiny

Délka pružiny v klidu:

$$x_0 = 42,8mm$$

<i>Naměřené parametry</i>		<i>Vypočtené parametry</i>	
<i>F</i>	<i>x<sub>n</sub></i>	<i>x</i>	<i>k<sub>m</sub></i>
[N]	[mm]	[mm]	[N/mm]
4,30	39,10	3,70	1,162
7,44	35,50	7,30	1,019
9,61	32,20	10,60	0,907
12,24	28,60	14,20	0,862
15,30	25,70	17,10	0,895
17,12	23,80	19,00	0,901
18,42	21,80	21,00	0,877
19,01	21,60	21,20	0,897
21,00	17,70	25,10	0,837
24,90	15,00	27,80	0,896
24,62	14,30	28,50	0,864

Tabulka 1 - Parametry pružiny

Pro výpočet tuhosti je třeba znát sílu potřebnou k protažení a vzdálenost, o kterou se pružina natáhne. Z obr. 14 je vidět, že jsem neměřil přímo prodloužení, ale délku pružiny po zkrácení. Jelikož známe délku pružiny v klidu, je možné spočítat vzdálenost  $x$  podle vzorce:

$$x = x_0 - x_n \quad (4.1.1)$$

Tuhost pružiny se potom spočte dle síly potřebné k natažení o vzdálenost  $x$ , lomené vzdáleností  $x$ , zapsané ve vzorci:

$$k_m = \frac{F}{x} \quad (4.1.2)$$

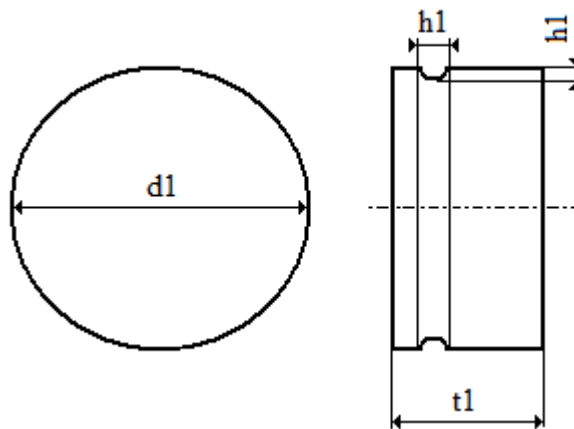
Tímto způsobem získáme sadu tuhostí v každém bodě měření. Výslednou tuhost určíme jako aritmetický průměr, dle vzorce:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{N=11} k_{mi}}{N} \quad (4.1.3)$$

Pomocí tohoto vzorce dojdeme k výsledku, kde  $k = 0,929 \frac{N}{mm} = 929 \frac{N}{m}$ .

## 4.2 Výpočet zátěžových parametrů

Dalšími parametry nutnými pro správné nastavení simulačních podmínek jsou momenty setrvačnosti jednotlivých rotačních prvků. Tyto prvky jsou čtyři. Tři jsou poháněné pohonem MCD. Jedná se o řemenici na motoru, hnací řemenici a hnanou řemenici. Posledním prvkem je kotouč umístěný na pohonu A-max.



Obr. 15 - Náčrty řemenice na motoru.

Pro výpočet momentu setrvačnosti řemenice motoru, je nejprve nutné spočítat její objem. Protože je zde drážka, aproximoval jsem poloměr pomocí přepočtu plochy v řezu řemenice, a to podle vzorce:

$$r_1 = \frac{(t_1 - h_1) \cdot h_1}{t_1} + \frac{d_1}{2} - h_1 \quad (4.2.1)$$

Protože objem plného válce se spočte dle vzorce:

$$V = \pi r^2 \cdot h \quad (4.2.2)$$

Moment setrvačnosti plného válce se spočte pomocí vzorce:

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (4.2.3)$$

Posledním vzorcem nutným k výpočtu momentu setrvačnosti je výpočet hmotnosti, známe-li objem a hustotu materiálu. Hmotnost se spočte dle vzorce:

$$m = \rho \cdot V \quad (4.2.4)$$

Dosadíme-li vzorce (4.2.1), (4.2.2), (4.2.4) do vzorce (4.2.3) dostaneme vzorec pro výpočet momentu setrvačnosti řemenice motoru J.

$$J = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot t_1 \cdot \left( \frac{(t_1 - h_1) \cdot h_1}{t_1} + \frac{d_1}{2} - h_1 \right)^4 \quad (4.2.5)$$

$$d_1 = 28,5 \text{ mm} = 0,0285 \text{ m}$$

$$h_1 = 2,5 \text{ mm} = 0,0025 \text{ m}$$

V našem případě jsou rozměry řemenice:

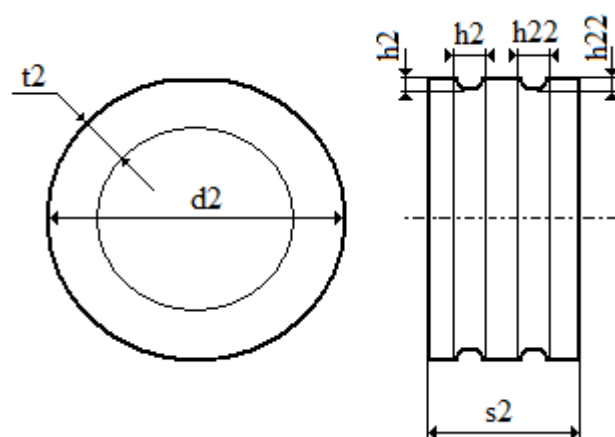
$$t_1 = 17,7 \text{ mm} = 0,0177 \text{ m}$$

$$\rho = 1340 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Po dosazení všech rozměrů do vzorce (4.2.5), vypočteme moment setrvačnosti řemenice motoru.

$$J = 1,4621 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

Dalším prvkem je hnací řemenice. Obdobně jako u řemenice na motoru, se jedná o válec. Nikoliv však plný, ale dutý, protože je naražen na ložisku. Náčrtek hnací řemenice je zobrazen na obrázku.



Obr. 16 - Náčrtek hnací řemenice

Jako v předchozím případě je nejprve nutno přepočítat poloměr řemenice pomocí aproximace plochy v řezu. Protože jsou zde dvě drážky, je vzorec o něco delší.

$$r_2 = \frac{\left((s_2 - h_2 - h_{22}) \cdot h_{22}\right) + (h_{22} - h_2) \cdot h_2}{s_2} + \frac{d_2}{2} - h_{22} \quad (4.2.6)$$

Jelikož se jedná o dutý válec, je výpočet jeho objemu odlišný, dle vzorce:

$$V = \pi (r_2 - r_1)^2 \cdot h \quad (4.2.7)$$

Ze stejného důvodu je odlišný i vzorec pro vlastní výpočet momentu setrvačnosti.

$$J = \frac{1}{2} m (r_2^2 + r_1^2) \quad (4.2.8)$$

Vzorec pro výpočet hmotnosti je samozřejmě stejný. Dosadíme-li tedy vzorce (4.2.4), (4.2.6), (4.2.7) do vzorce pro výpočet momentu setrvačnosti dutého válce (4.2.8), pak dostaneme výsledný vzorec ve tvaru:

$$J = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \left( \left( \frac{\left( (s_2 - h_2 - h_{22}) \cdot h_{22} \right) + (h_{22} - h_2) \cdot h_2}{s_2} \right) - \left( \frac{d_2}{2} - t_2 \right) \right)^2 \cdot s_2 \cdot \left\{ \left[ \frac{\left( (s_2 - h_2 - h_{22}) \cdot h_{22} \right) + (h_{22} - h_2) \cdot h_2}{s_2} + \frac{d_2}{2} - h_{22} \right]^2 + \left[ \frac{d_2}{2} - t_2 \right]^2 \right\} \quad (4.2.9)$$

$$d_2 = 46 \text{ mm} = 0,046 \text{ m}$$

$$h_2 = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$$

$$h_{22} = 2,5 \text{ mm} = 0,0025 \text{ m}$$

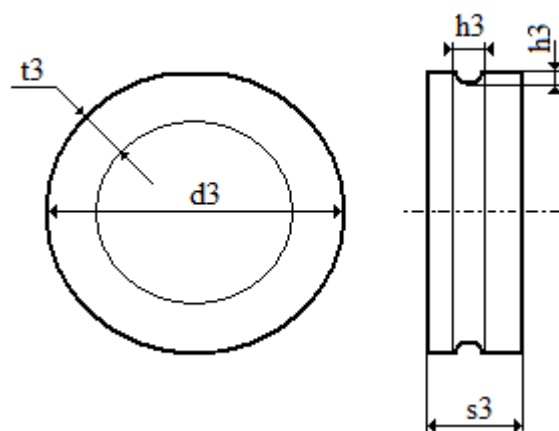
Rozměry hnací řemenice jsou:  $s_2 = 15,7 \text{ mm} = 0,0157 \text{ m}$

$$t_2 = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$$

$$\rho = 1340 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Po dosazení těchto hodnot do vzorce (4.2.9) jsem dostal, že hodnota momentu setrvačnosti hnací řemenice je:

$$J = 8,2498 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$$



Obr. 17 - Návrh hnací řemenice

Posledním prvkem, který je připojen na pohon MCD, je hnaná řemenice. Ta má pouze jednu drážku, jak je to zobrazeno na obr. 17.

Aproximace poloměru se spočte, dosadíme-li do vzorce (4.2.1) nové parametry.

$$r_3 = \frac{(s_3 - h_3) \cdot h_3}{s_1} + \frac{d_3}{2} - h_3 \quad (4.2.10)$$

Vzorec pro výpočet objemu dutého válce zůstává stejný, tzn. vzorec (4.2.7), stejně jako vzorec pro výpočet hmotnosti (4.2.4). Dosadíme-li tyto vzorce do vzorce pro výpočet momentu setrvačnosti dutého válce (4.2.8), dostaneme:

$$J = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \left( \left[ \left( \frac{(s_3 - h_3) \cdot h_3}{s_1} + \frac{d_3}{2} - h_3 \right) - \left( \frac{d_3}{2} - t_3 \right) \right]^2 \cdot s_3 \left[ \left( \frac{(s_3 - h_3) \cdot h_3}{s_1} + \frac{d_3}{2} - h_3 \right)^2 + \left( \frac{d_3}{2} - t_3 \right)^2 \right] \right) \quad (4.2.11)$$

$$d_3 = 46 \text{ mm} = 0,046 \text{ m}$$

$$h_3 = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$$

Rozměry hnané řemenice jsou:  $s_3 = 9,2 \text{ mm} = 0,0092 \text{ m}$

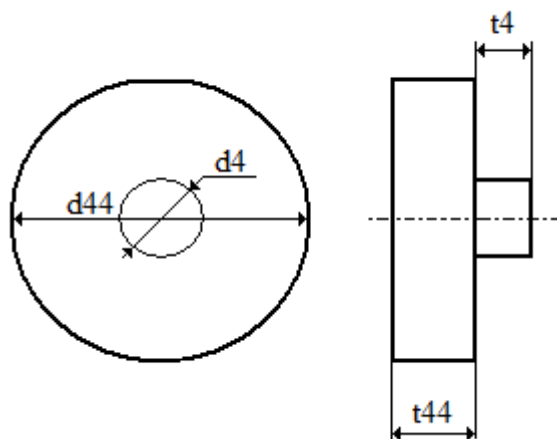
$$t_3 = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$$

$$\rho = 1340 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Po dosazení těchto hodnot do (4.2.11), dostaneme moment setrvačnosti hnané řemenice:

$$J = 4,4852 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

Posledním rotačním prvkem na modelu, je kotouč poháněný pohonem A-max. Jedná se o mosazný kotouček s úchytovým válečkem. Oba válečky jsou plné, proto použijeme výše uvedené vzorce. Návrh tohoto rotačního prvku je na obrázku 18.



Obr. 18 - Nákres kotouče

Moment setrvačnosti spočteme jako součet momentů setrvačnosti dvou válců, upravením vzorce (4.2.3):

$$J = \frac{1}{2} \left( m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 \right) \quad (4.2.12)$$

Vzorec pro výpočet hmotnosti je opět stejný (4.2.4), a dosadíme-li ho do vzorce (4.2.12), tak dostaneme:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot \left( \left( \frac{d_{44}}{2} \right)^4 \cdot t_{44} + \left( \frac{d_4}{2} \right)^4 \cdot t_4 \right) \quad (4.2.13)$$

$$d_4 = 40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$$

$$d_{44} = 7 \text{ mm} = 0,007 \text{ m}$$

Rozměry kotouče jsou :  $t_4 = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$

$$t_{44} = 8,5 \text{ mm} = 0,0085 \text{ m}$$

$$\rho = 8550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dosazením těchto rozměrů do rovnice (4.2.13) dostaneme hodnotu momentu setrvačnosti „řezného kotouče“.  $J = 8,612 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$



### **4.3 Nastavení regulátorů**

Nastavení regulátorů je důležitou součástí zajišťující správnou funkčnost modelu uzlu stroje. Jelikož je potřeba přesná regulace polohy s minimální odchylkou od žádané hodnoty, je kvalitní nastavení PID regulátoru nezbytné. V prostředí Epos Studia lze pro jednotlivé pohony nakonfigurovat různé parametry. Je možné použít defaultní parametry, které jsou předdefinovány pro každý jednotlivě zvolený pohon. Je samozřejmě možné použít ruční nastavení, kdy si sami zvolíme jednotlivé složky PID regulátoru. Pro optimální seřízení je však vhodné použít automatické nastavení. Nejprve se vyladí proudový regulátor, který je typu PI. Poté je nastaven otáčkový regulátor, který je také typu PI. Jako poslední se nastaví polohový regulátor, jenž jako jediný obsahuje i derivační složku. Všechna nastavení probíhají od počátečních parametrů, kdy systém hledá optimální nastavení dle postupných odezev motoru, resp. odchylek od požadovaného průběhu.

## **5 Porovnání teoretických a skutečných parametrů**

Na modelu uzlu stroje jsem provedl měření, v jehož rámci jsem nastavil regulátory v prostředí Epos Studio. V kapitole 3 jsem odvodil model stejnosměrného motoru, který jsem zapojil v programu Matlab Simulink. Dosazením mechanických parametrů do matematického modelu společně se změřenými hodnotami PID regulátorů, je možné simulovat průběhy odezev jednotlivých pohonů při různém nastavení regulátorů, a při různé zátěži. Tyto nasimulované průběhy lze porovnat se skutečně změřenými.

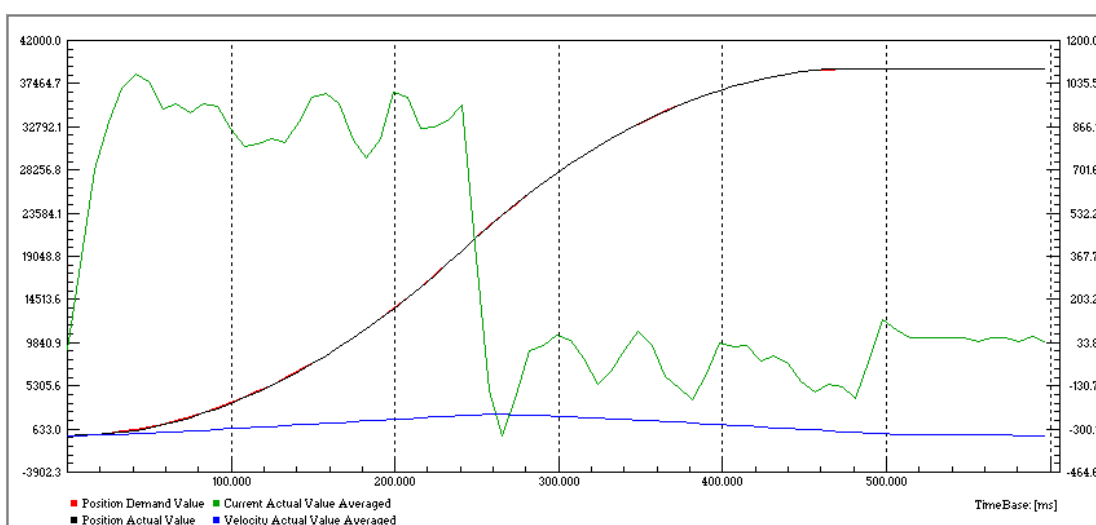
### **5.1 Defaultní a optimalizované nastavení PID regulátoru - MCD**

Při tomto měření bylo hlavní kritérium dosažení zadané polohy 38000qc. Průběh by měl být co nejrychlejší a bez kmitání po dosažení polohy, aby na modelu nedocházelo k nekontrolovatelnému pohybu v ose pojezdu. Odměřil jsem jak defaultní nastavení PID regulátoru, tak i optimalizované. Oba průběhy jsou zobrazeny v grafu 1, a grafu 2. V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty jednotlivých složek

regulátoru. Optimalizované parametry jsem nastavil pomocí funkce Auto Tuning, která je v Epos Studiu implementována.

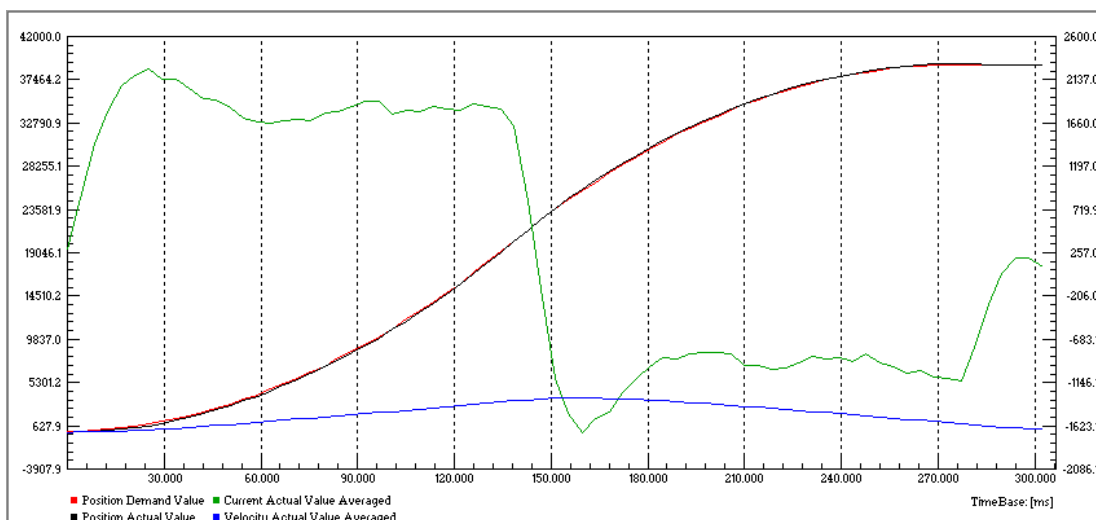
<i>Parametry PID regulátorů v Eposu</i>				<i>Parametry PID regulátorů v Eposu</i>			
<i>Defaultní</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>	<i>Optimalizovaný</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
<i>Proudový</i>	800	200	0	<i>Proudový</i>	2264	450	0
<i>Rychlostní</i>	1000	100	0	<i>Rychlostní</i>	1527	195	0
<i>Polohový</i>	150	10	200	<i>Polohový</i>	448	20	184

Tabulka 2. Parametry PID regulátorů v Epos Studiu - MCD



Graf 1. Průběh polohy, proudu a otáček při defaultním nastavení bez zátěže - Epos

Na grafu 1 jsou na levé ose vyneseny hodnoty polohy a rychlosti. Na pravé ose je hodnota proudu.



Graf 2. Průběh polohy, proudu a otáček při opt. nastavení bez zátěže – Epos

Je vidět, že průběh polohy je bez kmitání, a k ustálení došlo již v čase 0,5s. Po ustálení polohy dojde i k ustálení proudu. Při použití optimalizovaných parametrů se výrazně zrychlil průběh, a k ustálení polohy došlo již v čase 0,3s, což je o 0,2s rychlejší, než defaultní nastavení. Také došlo k vyhlazení průběhu proudu.

Pro simulaci průběhů v Matlabu bylo třeba zadat mechanické parametry modelu. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 3. V tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty složek regulátorů použitých pro simulaci. Průběhy jsou uvedeny na grafu 3.

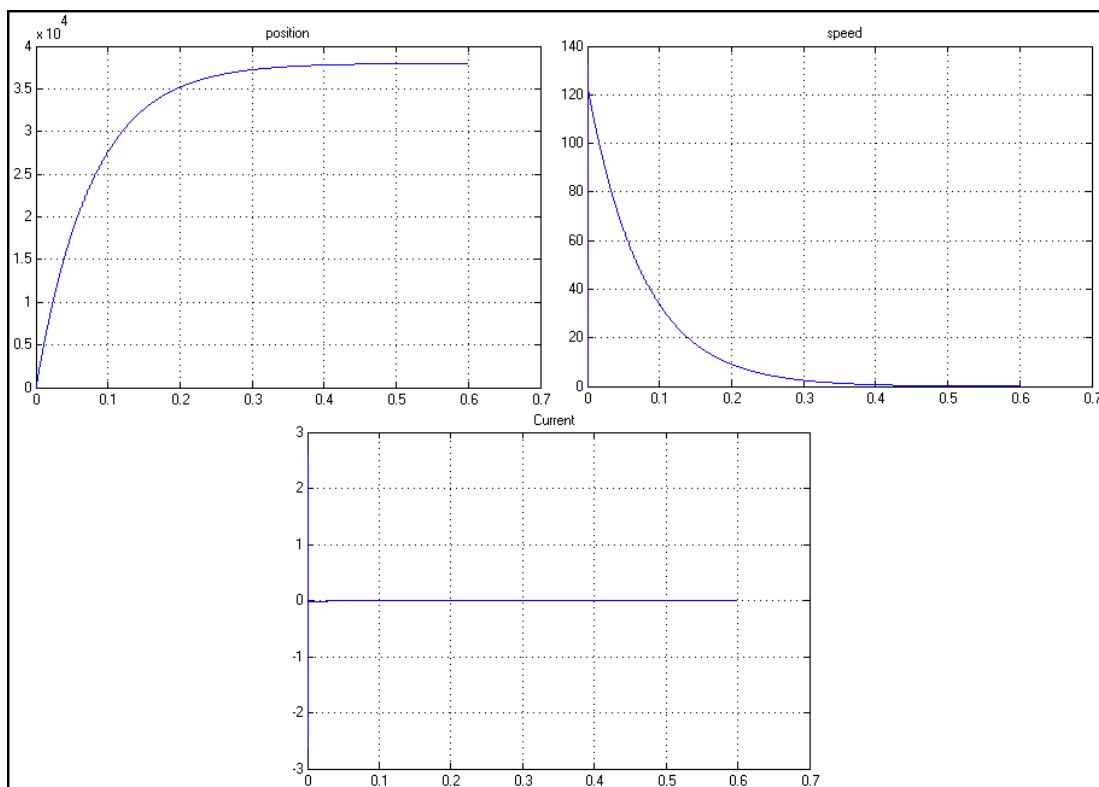
<i>Parametry motoru MCD v Matlabu</i>	
<i>Odpor <math>R</math></i>	<i>1,27 <math>\Omega</math></i>
<i>Indukčnost <math>L</math></i>	<i>0,143 mH</i>
<i>Rychlostní konstanta <math>C_{sf} \cdot u</math></i>	<i>393 rpm/V</i>
<i>Momentová konstanta <math>C_{sf} \cdot I</math></i>	<i>0,0243 Nm/A</i>
<i>Moment setrvačnosti <math>J_{mot}</math></i>	<i><math>2,29 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2</math></i>

Tabulka 3. Parametry MCD motoru v Matlabu

<i>Parametry PID regulátorů v Matlabu</i>			
	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
<i>Proudový</i>	<i>7</i>	<i>0,5</i>	<i>0</i>
<i>Rychlostní</i>	<i>2</i>	<i>0,1</i>	<i>0</i>
<i>Polohový</i>	<i>20</i>	<i>0</i>	<i>0</i>

Tabulka 4. Parametry PID regulátoru v Matlabu

Jak je vidět z grafu 3, k ustálení polohy došlo v čase 0,5s, což odpovídá defaultnímu nastavení, avšak je to o 0,2 s pomalejší než optimalizované nastavení. K ustálení hodnoty proudu došlo také, přestože průběh neodpovídá naměřenému. Průběh rychlosti zdánlivě neodpovídá, avšak je to způsobeno velkým měřítkem v naměřených grafech.



Graf 3. Průběh polohy, proudu a otáček při optimalizovaném nastavení bez zátěže –  
Matlab

## 5.2 Optimalizované nastavení PID regulátoru se zátěží – MCD

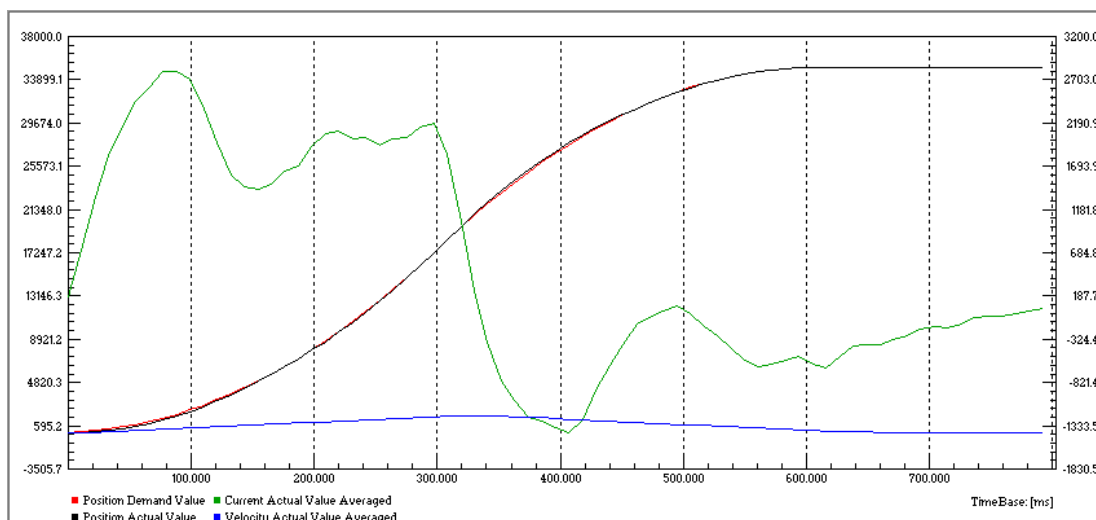
Při tomto měření byla stejná kritéria ohledně průběhu polohy. Ale cílová poloha byla pouze 36000qc. Důvodem bylo umístění zátěže, které v pohybu bránilo umístění držáku indukčního čidla. Hodnoty regulátorů a zátěže jsou uvedeny v tabulkách 5, resp. 6.

<i>Parametry PID regulátorů v Eposu</i>			
	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
<i>Proudový</i>	450	468	0
<i>Rychlostní</i>	764	486	0
<i>Polohový</i>	1482	30	375

Tabulka 5. Parametry PID regulátoru v Epos Studiu

<i>Parametry zátěže</i>	
<i>Zatěžovací moment</i>	<i>0,0436 Nm</i>
<i>Moment setrvačnosti</i>	<i><math>1,6487 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2</math></i>

Tabulka 6. Parametry zátěže v Matlabu



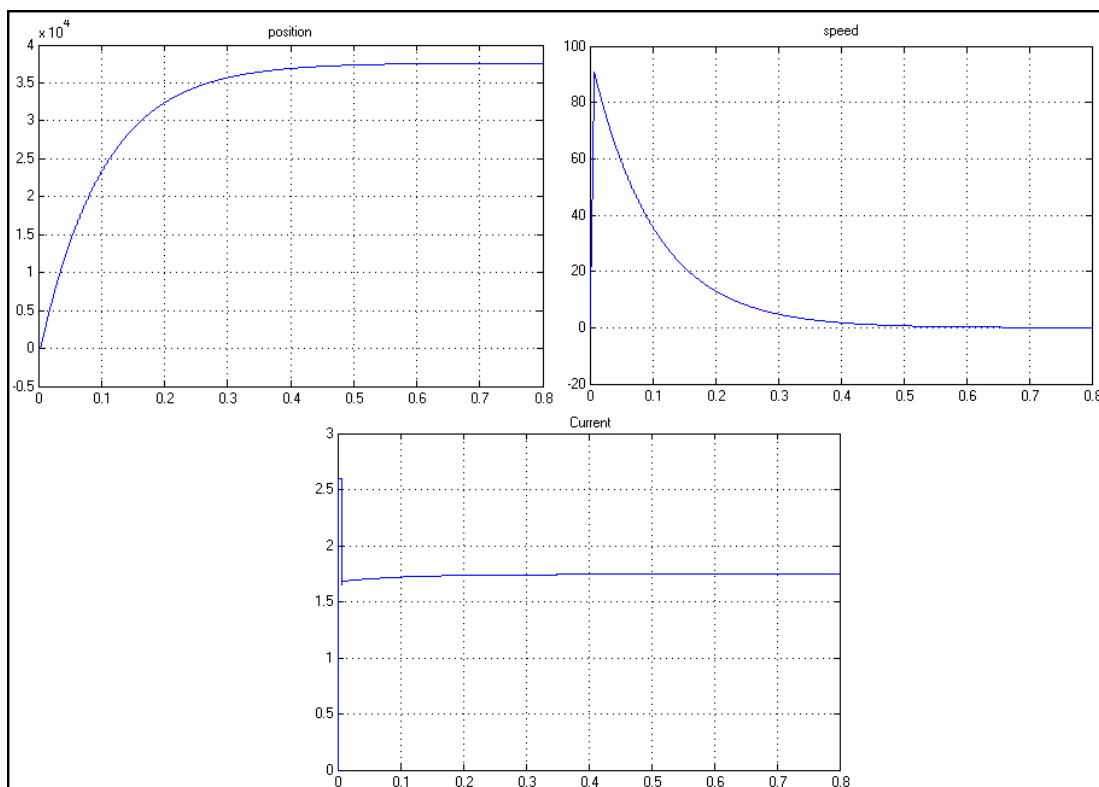
Graf 4. Průběh poloh, proudu a otáček při optimalizovaném nastavení se zátěží –Epos

Na grafu 4 je vidět, že i při zatížení došlo k ustálení polohy do 0,6s, což je jen o 0,1s pomalejší, než bez zátěže. Naproti tomu došlo k výraznému nárůstu proudu, a to až do horní meze, která byla 2,6A. Po ustálení polohy došlo i k ustálení hodnoty proudu na hodnotě blízké nule.

V Matlabu byly nastaveny parametry, které jsou uvedeny v tabulce 7, společně se zatěžovacími parametry, jenž jsou v tabulce 6.

<i>Parametry PID regulátorů v Matlabu</i>			
	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
<i>Proudový</i>	<i>7</i>	<i>0,5</i>	<i>0</i>
<i>Rychlostní</i>	<i>2</i>	<i>0,1</i>	<i>0</i>
<i>Polohový</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	<i>0</i>

Tabulka 7. Parametry PID regulátoru v Matlabu



Graf 5. Průběh polohy, proudu a otáček při opt. nastavení se zátěží – Matlab

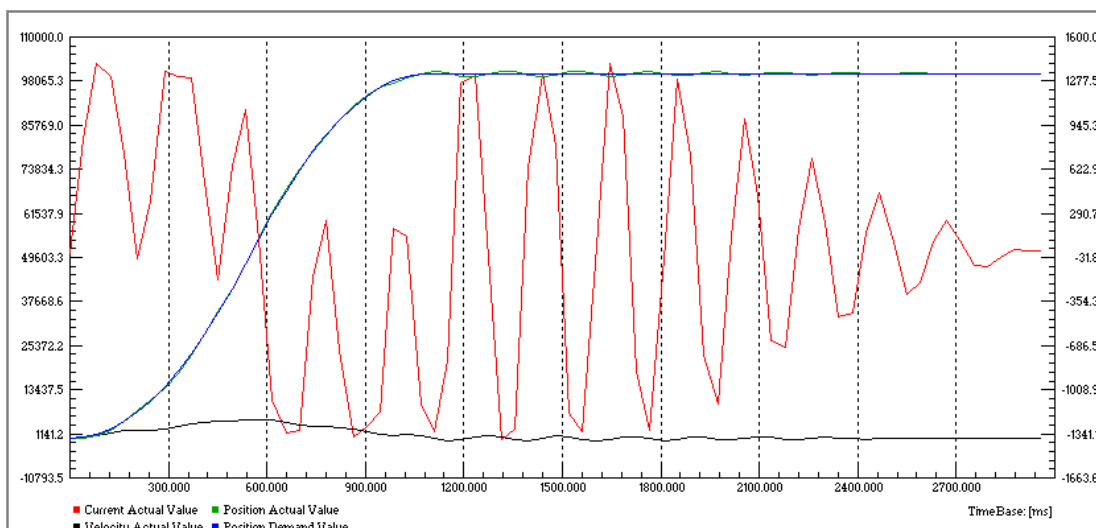
Na grafu 5 je vidět, že zdánlivě došlo k ustálení polohy, ale díky velkému měřítku není vidět regulační odchylka přibližně 200qc. Nedosažení žádané polohy je vidět na průběhu proudu, který se neustálil, ale zůstal na hodnotě přes 1,5A.

### 5.3 Defaultní nastavení PID regulátoru – A-max

Pohon A-max je použit pro pohon pily, a proto je hlavním kritériem dosažení a udržení žádané rychlosti otáčení při zatížení. Ale pro odměření průběhu a nastavení regulátoru není takový postup vhodný. Proto je zde stejně jako u MCD pohonu hodnoceno dosažení polohy. Žádaná poloha je 100000qc. Parametry regulátoru jsou uvedeny v tabulce 8.

<i>Parametry PID regulátorů v Eposu</i>			
	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
<i>Proudový</i>	400	200	0
<i>Rychlostní</i>	400	100	0
<i>Polohový</i>	150	10	200

Tabulka 8. Parametry PID regulátoru v Epos Studiu



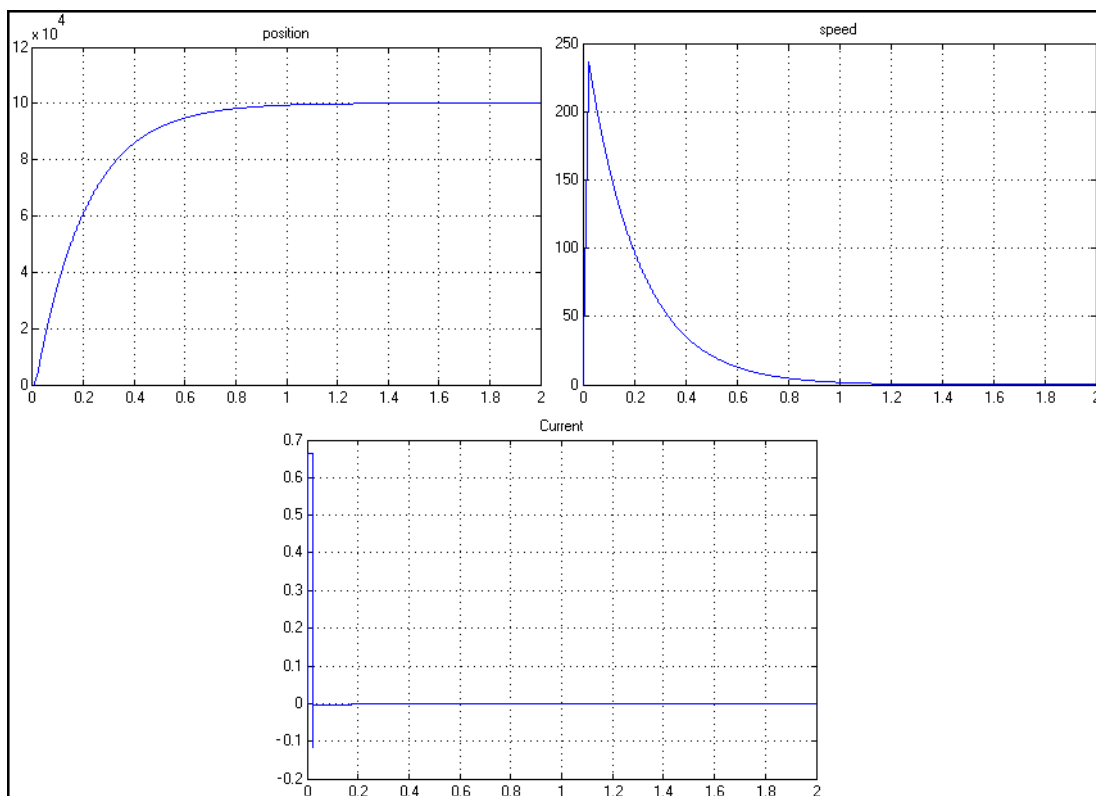
Graf 6. Průběh poloh, proudu a otáček při defaultním nastavení bez zátěže – Epos

Na grafu 6 je vidět, že při defaultním nastavení regulátoru došlo k dosažení polohy v čase kolem 1s, ale docházelo ke kmitání ještě další 2s. Je také vidět, že proudový regulátor prováděl příliš velké zásahy do soustavy, takže docházelo ke kmitání proudu, až do 3s, kdy došlo k ustálení na hodnotě blízké nule.

Pro nasimulování motoru v Matlabu jsou hodnoty regulátorů uvedeny v tabulce 9 a hodnoty mechanických parametrů motoru v tabulce 11.

<i>Parametry PID regulátorů v Matlabu</i>			
	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
<i>Proudový</i>	10	2	0
<i>Rychlostní</i>	2	0,2	0
<i>Polohový</i>	5	0	0

Tabulka 9. Parametry PID regulátoru v Epos Studiu



Graf 7. Průběh polohy, proudu a otáček při defaultním nastavení bez zátěže – Matlab

V grafu 7 je zřejmé, že došlo k ustálení polohy v čase 1,2s, a to s nulovou regulační odchylkou. Stejně tak došlo i k ustálení průběhu rychlosti, přičemž maximální rychlostní špička byla 240 rpm. U průběhu proudu nastalo dosažení maximální mezní hodnoty, takže došlo k mírné proudové špičce v záporném směru, a brzkému ustálení již v čase 0,2s.

#### 5.4 Optimalizované nastavení PID regulátoru se zátěží – A-max

Při tomto měření byly stejné podmínky, jako u předešlého, ale na hřídeli motoru byla umístěna zátěž v podobě mosazného kotoučku, jehož moment setrvačnosti byl spočten v kapitole 4.2. Parametry regulátorů jsou uvedeny v tabulce 12, a zátěžové parametry v tabulce 10.

<i>Parametry zátěže</i>	
<i>Zatěžovací moment</i>	<i>0,0 Nm</i>
<i>Moment setrvačnosti</i>	<i><math>8,612 \cdot 10^{-6} \text{kgm}^2</math></i>

Tabulka 10. Parametry zátěže v Matlabu



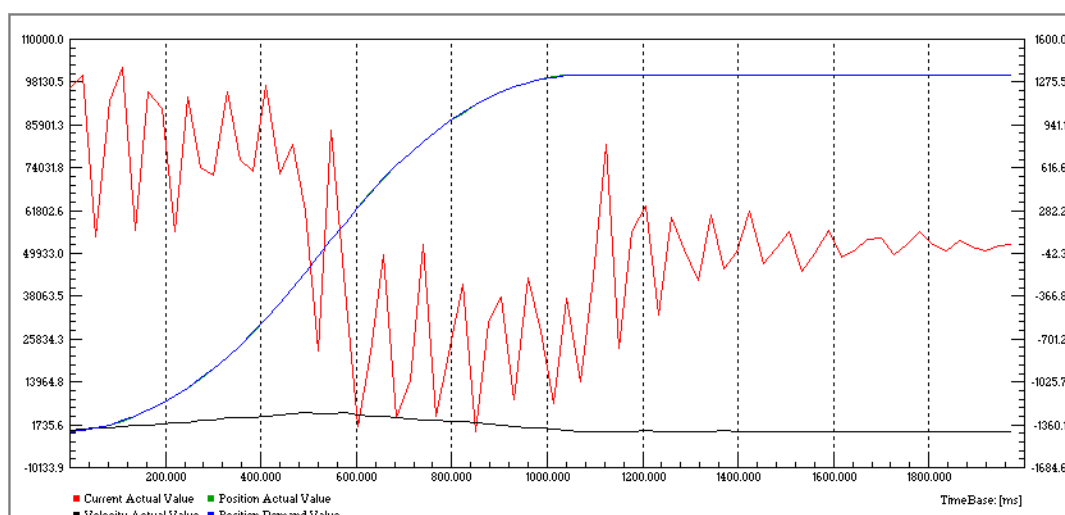
<i>Parametry motoru A-max</i>	
<i>Odpor R</i>	<i>5,74 <math>\Omega</math></i>
<i>Indukčnost L</i>	<i>0,362 mH</i>
<i>Rychlostní konstanta <math>C_{sfi} u</math></i>	<i>875 rpm/V</i>
<i>Momentová konstanta <math>C_{sfi} I</math></i>	<i>0,0109 Nm/A</i>
<i>Moment setrvačnosti <math>J_{mot}</math></i>	<i><math>0,426 \cdot 10^{-6} \text{kgm}^2</math></i>

Tabulka 11. Parametry A-Max motoru v Matlabu

<i>Parametry PID regulátorů v Eposu</i>			
<i>optimalizovaný</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
<i>Proudový</i>	<i>499</i>	<i>546</i>	<i>0</i>
<i>Rychlostní</i>	<i>713</i>	<i>147</i>	<i>0</i>
<i>Polohový</i>	<i>1056</i>	<i>30</i>	<i>261</i>

Tabulka 12. Parametry PID regulátoru v Epos Studiu

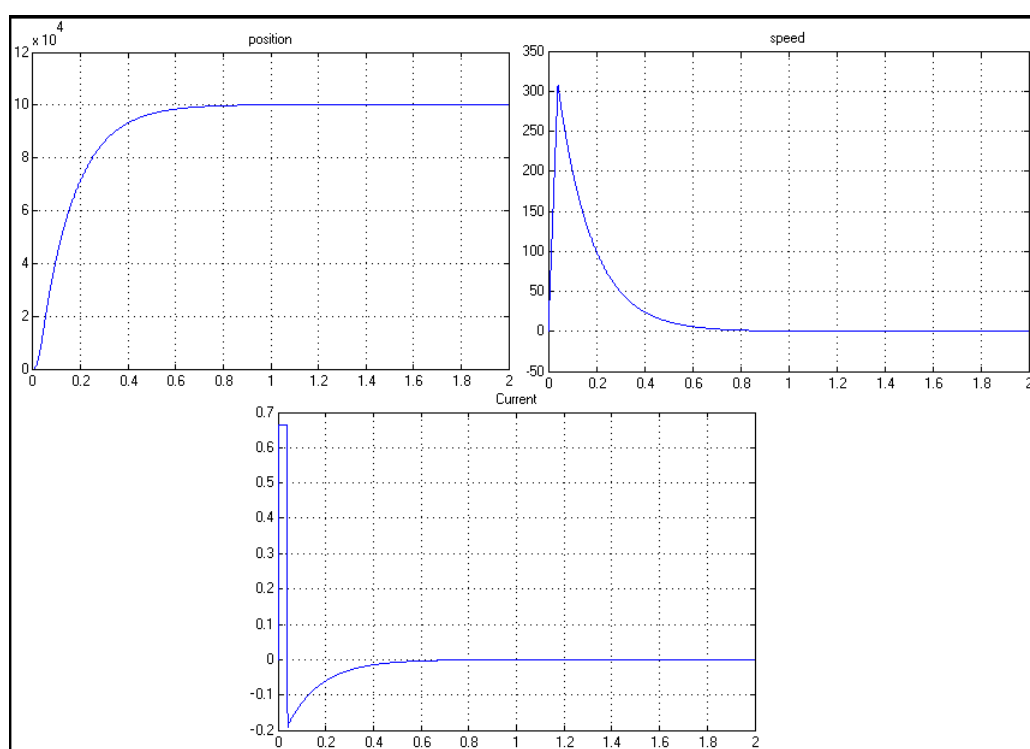
Z grafu 8 je zřetelně vidět, že při optimalizovaném nastavení regulátoru dojde k rychlejší stabilizaci polohy, a to v čase 1s, což je oproti defaultnímu nastavení rychlejší o 2 s (bráno i s dokmitáním). Průběh proudu je sice stále kmitavý, ale s mnohem větším útlumem, proto k ustálení dojde již v čase 1,5s. Hodnoty regulátorů použitých pro simulaci v Matlabu jsou uvedeny v tabulce 13.



Graf 8. Průběh polohy, proudu a otáček při optimalizovaném nastavení se zátěží – Epos

<i>Parametry PID regulátorů v Matlabu</i>			
<i>optimalizovaný</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
<i>Proudový</i>	10	2	0
<i>Rychlostní</i>	2	0,2	0
<i>Polohový</i>	7	0	0

Tabulka 13. Parametry PID regulátoru v Epos Studiu



Graf 9. Průběh polohy, rychlosti a proudu při optimalizovaném nastavení se zátěží –  
Matlab

Na posledním 9. grafu ze simulace je zřejmé ustálení polohy v čase 0,8s, což je o 0,2 s rychlejší než ve skutečnosti. Rychlostní špička se posunula na hodnotu 310rpm. Stejně jako v případě nezátíženého motoru došlo k dosažení mezní proudové hodnoty, ale záporný proud již nebyl ve formě špičky, ale postupného ustálení směrem k nulové hodnotě.

## **5.5 Vyhodnocení porovnání**

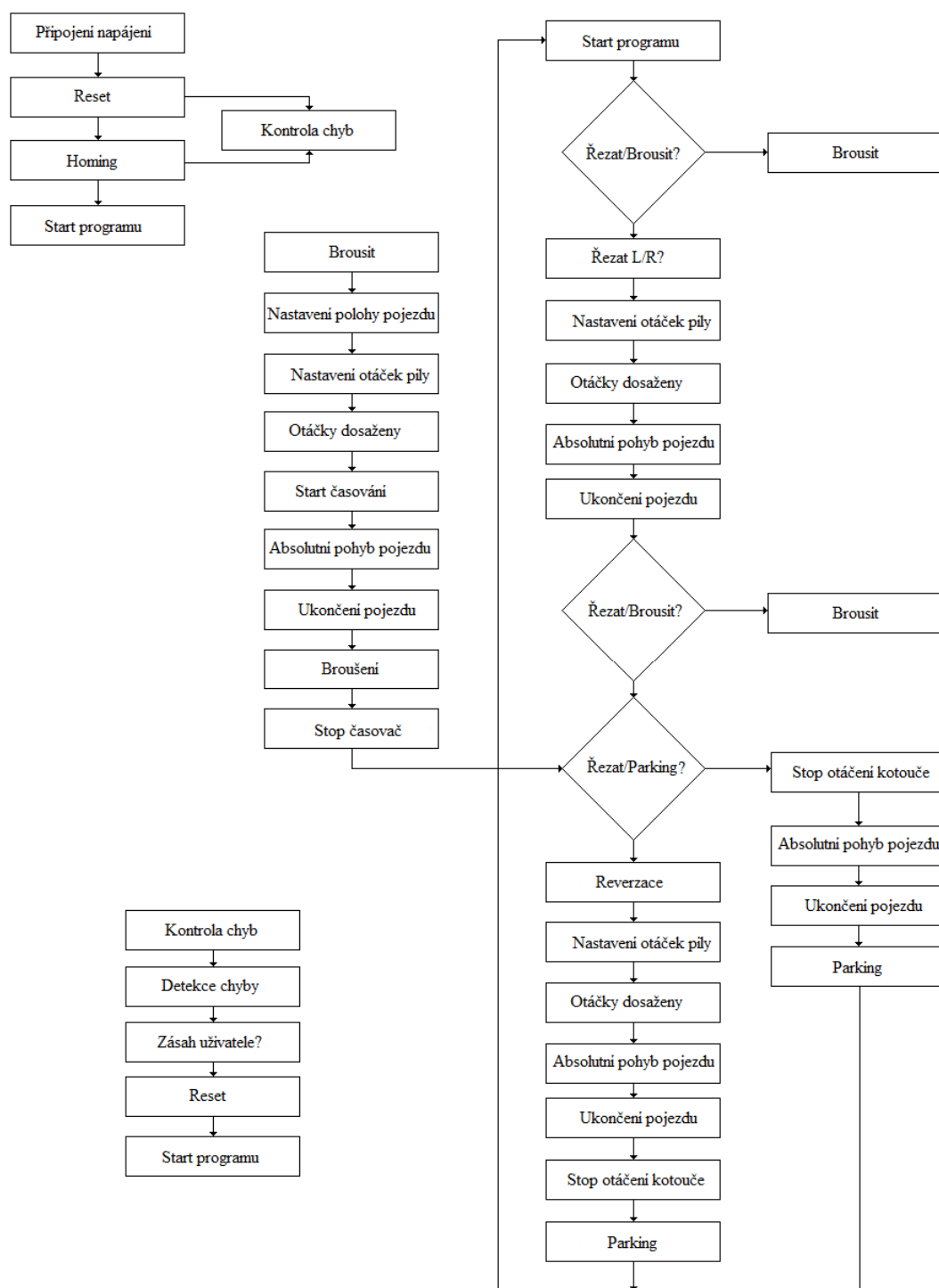
Jak je vidět z jednotlivých grafů, tak nasimulované průběhy v Matlabu se výrazně liší od skutečně změřených v Epos Studiu. Stejně tak jednotlivé parametry regulátorů si vůbec neodpovídají. Základním problémem je fakt, že pro regulaci v Epos studiu je použita speciální regulační struktura Maxon, avšak pro simulaci v Matlabu jsem použil kaskádní regulaci. Jednotlivé parametry jsem tak musel odladit dle podobnosti se skutečně změřeným průběhem. Dalším problémem je, že Epos Studio ze zadané polohy, zadaných otáček a ze zadané maximální akcelerace a decelerace spočte polohovou S-křivku, jejíž průběh je poté žádaným průběhem polohy. Už z tohoto důvodu si odměřené a nasimulované průběhy nemohou odpovídat, protože pro simulaci jsem použil žádaný průběh polohy ve formě skokové změny. Díky tomu se také neosvědčilo použití PID polohového regulátoru, protože v tomto případě byl simulovaný systém skoro vždy nestabilní, nebo alespoň značně kmitavý. Průběhy rychlosti si také neodpovídají, ale to je způsobeno především velkým měřítkem, na němž je vynesena jak rychlost, tak i poloha.

## **6 Řídící program**

Aby bylo možné ovládat model uzlu stroje i po odpojení od počítače, je třeba nahrát do jednotky Epos P, která je součástí pohonu MCD, řídicí program. Aby celý model mohl pracovat, tak je třeba k vlastnímu řídicímu kódu doplnit proměnné, které definují jednotlivé vstupy a ošetřit chybové stavy.

### **6.1 Vývojový diagram**

Popisuje základní strukturu kroků, ve kterých program postupně pracuje a osvětluje jednotlivé návaznosti, a jednotlivá rozhodování, která jsou prováděna na základě informací z digitálních vstupů.



Obr. 19 – Vývojový diagram řídicího programu

## 6.2 Vstupní parametry

Vstupními parametry jsou:

- požadovaný směr otáčení řezného kotouče
- broušení kotouče
- reset zařízení
- rychlost otáčení řezného kotouče
- signál z čidla definujícího „domácí“ polohu

## 6.3 Chybové stavy

V modelu uzlu stroje se samozřejmě může vyskytnout chybový stav. Jelikož se jedná o zařízení s mechanickou částí, mohou se vyskytnout jak chyby elektrického charakteru, tak i mechanického. Po odstranění chyby je třeba provést reset zařízení, případně vymazání chyb ze systému, pokud je model připojen k počítači.

Chybový stav elektrický			
	Chyba	Možná příčina	Způsob odstranění
1	Nízké napětí	Nedostatečné napájecí napětí	Zvýšení napájecího napětí
		Vysoká hodnota akcelerace	Snížení maximálního zrychlení
2	Přetížení	Pokles napětí vlivem proudové špičky	Zvýšení proudové ochrany
			Snížení zatížení motoru
3	Chyba komunikace	Interní chyba	Nutné PC
		Poškození kabeláže	Výměna kabeláže, konektorů
Chybový stav mechanický			
4	Diference polohy	Diference mezi Hallovyými sondami a enceoderem - Interní chyba	Výměna snímačů
		Proklouznutí lanka na řemenici	Provést reset, nebo homing
5	Nenalezení parkovací polohy	Špatná montáž motoru - opačný, než předpokládaný směr posuvu	Správná montáž motoru
		Vadné indukční čidlo	Výměna čidla
		Nesprávná vzdálenost čidla od lanka posuvu	Seřízení vzdálenosti
		Mechanické posunutí pojezdu mimo prohledávanou oblast	Návrat pojezdu do prohledávané oblasti

Tabulka 14. Chybové stavy

## 7 Zhodnocení

V úvodu práce je vlastní seznámení s mechatronickým modelem. Jelikož stěžejním prvkem jsou stejnosměrné pohony, je jejich popisu věnován značný prostor. Postupně je vysvětlen princip činnosti stejnosměrného motoru a jsou uvedena různá konstrukční uspořádání motoru. Je popsán jak kartáčový, tak i bezkartáčový motor, protože na modelu jsou umístěny oba typy motorů. Dále je popis řízení kartáčového motoru, a vysvětlení principu řízení bezkartáčového motoru, společně s úskalími, která tento typ motoru přináší. Zbytek kapitoly je věnován popisu komunikační struktury, do níž je model uspořádán, společně s informacemi o jednotlivých komunikačních rozhraních, která jsou na modelu použita.

Ovládacímu panelu je vyhrazena druhá kapitola, v níž jsou uvedeny jednotlivé požadavky, které musí panel splňovat. Je uvedena bloková struktura propojení panelu a ostatních zařízení.

Další část je věnována odvození matematického modelu motoru. Z náhradního schématu jsou odvozeny napěťová i momentová rovnice. Dle těchto rovnic je sestaveno simulační schéma v Matlabu. Vytvořené schéma je zapojeno do regulační kaskádní struktury, ve které jsou použity proudový, otáčkový a polohový regulátor. Je zde zmíněno, že pohony Maxon nepoužívají pro regulační pochod kaskádní uspořádání, ale speciálně vyvinutou regulační strukturu.

Ve čtvrté kapitole je pojednáno o jednotlivých mechanických měřeních, která byla na modelu provedena, a jsou odvozeny vzorce pro výpočet jednotlivých zátěžových parametrů, které jsou potřebné pro simulaci pohonu. Následuje popis výsledků a chování modelu při jednotlivých nastaveních regulátorů. Tyto výsledky jsou poté porovnány s nasimulovanými průběhy a vzájemně vyhodnoceny. V závěrečné části jsou popsány jednotlivé vstupní parametry, kterými je model skrze ovládací panel ovládán. Je zobrazeno vývojové schéma, na jehož základě je vytvořen vlastní řídicí program, a jsou uvedeny jednotlivé chybové stavy společně s možnou příčinou a postupem jejich odstranění.

## **Závěr**

Cílem této práce bylo vytvořit model mechatronického uzlu stroje jednoosé pily. Součástí toho bylo i seznámení se s návrhovými pravidly pro tvorbu desky plošného spoje ovládacího panelu, mnoha různými možnostmi zapojení a dostupnými metodami pro naprogramování řídicí jednotky. Na modelu bylo ověřeno chování motorů s různým nastavením regulátorů, a byl posouzen vliv tohoto nastavení na chod jednotlivých motorů.

Díky změření mechanických parametrů a jejich dosazením do vytvořeného matematického modelu, mohla být reálná měření porovnána s teoretickými. Dále byl proveden rozbor komunikačních rozhraní. Možným navázáním by bylo rozšíření o další nastavovací parametry, a rozšíření řídicího programu.

### Seznam zkratk:

CAN – Controller area network

NMT – Network management

OD – Object dictionary

PDO – Process data objects

SDO – Service data objects

### Seznam literatury:

[1] SOUČEK, Pavel. *Servomechanismy ve výrobních strojích*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6

[2] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada publishing a.s., 2003. ISBN 80-247-0507-9

[3] Elektronická dokumentace Uzimex Praha, *Malé stejnosměrné motory Maxon*. [www.uzimex.cz](http://www.uzimex.cz), Praha, 2002, Verze 1.1

[4] MODRLÁK, Osvald. *Teorie automatického řízení I., Syntéza regulačních obvodů*. Studijní materiály, 2004, [http://mono.rss.tul.cz/skola/pdf/tar1\\_syn.pdf](http://mono.rss.tul.cz/skola/pdf/tar1_syn.pdf)

[5] Maxon motor control: *Epos P, programmable Position Controller – Programming reference*, Sachseln, Maxon motor ag, 2008, Doc.Nr. 786912-04

[6] Maxon motor control: *Epos P, programmable Position Controller – Firmware Specification*, Sachseln, Maxon motor ag, 2007, Doc.Nr. 810011-01

[7] Maxon motor control: *Epos Position Controller, Application note – CANopen Basic Information*, Sachseln, Maxon motor ag, 2008

[8] <http://hw.cz/Produkty/Obecne-produkty/ART1563-Co-je-CANopen-a-jak-na-nej.html>

[9] RYDLO, Pavel. *Přednáška servomechanismy, SVM regulace*, Liberec, 2008

[10] Maxon motor control: *Epos Position Controller, Application note - Position regulation with feed forward*, Sachseln, Maxon motor ag, 2008

[11] Maxon motor control: *Mcd Epos P 60W, Hardware reference*, Sachseln, Maxon motor ag, 2007, Doc.Nr. 787218-02

[12] Maxon motor control: *Mcd Epos, Cable starting set*, Sachseln, Maxon motor ag, 2007, Doc.Nr. 787798-02



[13] Maxon motor control: *Epos 24/1, Getting started*, Sachseln, Maxon motor ag, 2007, Doc.Nr. 573049-08

[14] Maxon motor control: *Epos 24/1, Hardware reference*, Sachseln, Maxon motor ag, 2008, Doc.Nr. 573047-09

[15] Maxon motor: *Catalogue program 08/09*, Sachseln, Maxon motor ag, 2008

[16] Elektronická dokumentace Balluff: *Hlavní katalog snímačů 07*,  
[http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S11\\_0703\\_cz.pdf#page=15](http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S11_0703_cz.pdf#page=15)

### Seznam obrázků:

1) Klasický stejnosměrný motor	11
2) Stejnosměrný motor Maxon se samonosným vinutím	12
3) Stejnosměrný motor Maxon s elektronickou komutací	13
4) Průběh signálu z Hallových sond	15
5) Obdelníkový a sinusový průběh napájecího napětí	15
6) Řez motorem Maxon A-Max	16
7) Řez elektronicky komutovaným motorem Maxon EC-Max	17
8) Blokové schéma zapojení ovládacího panelu	19
9) Principiální schéma motoru	20
10) Náhradní schéma motoru	21
11) Model motoru v Matlabu	23
12) Zapojení kaskádní regulační struktury	24
13) Regulační struktura Maxon	25
14) Schéma měření tuhosti pružiny	26
15) Náčrt řemenice na motoru	27
16) Náčrt hnací řemenice	29
17) Náčrt hnané řemenice	30
18) Náčrt kotouče	32
19) Vývojový diagram řídicího programu	44

### Seznam tabulek:

1) Parametry pružiny	26
2) Parametry PID regulátorů v Epos Studiu – MCD	34

3) Parametry MCD motoru v Matlabu	35
4) Parametry PID regulátoru v Matlabu	35
5) Parametry PID regulátoru v Epos Studiu – MCD	36
6) Parametry zátěže v Matlabu	37
7) Parametry PID regulátoru v Matlabu	37
8) Parametry PID regulátoru v Epos Studiu	38
9) Parametry PID regulátoru v Epos Studiu	39
10) Parametry zátěže v Matlabu	40
11) Parametry A-Max motoru v Matlabu	41
12) Parametry PID regulátoru v Epos Studiu	41
13) Parametry PID regulátoru v Epos Studiu	42
14) Chybové stavy	45

### **Seznam grafů:**

1) Průběh poloh, proudu a otáček při defaultním nastavení bez zátěže – Epos	34
2) Průběh poloh, proudu a otáček při opt. nastavení bez zátěže – Epos	34
3) Průběh polohy, proudu a otáček při optimalizovaném nastavení bez zátěže – Matlab	36
4) Průběh poloh, proudu a otáček při optimalizovaném nastavení se zátěží –Epos	37
5) Průběh polohy, proudu a otáček při opt. nastavení se zátěží – Matlab	38
6) Průběh poloh, proudu a otáček při defaultním nastavení bez zátěže – Epos	39
7) Průběh polohy, proudu a otáček při defaultním nastavení bez zátěže – Matlab	40
8) Průběh polohy, proudu a otáček při optimalizovaném nastavení se zátěží – Epos	41
9) Průběh polohy, rychlosti a proudu při optimalizovaném nastavení se zátěží – Matlab	42

### **Obsah příloženého CD**

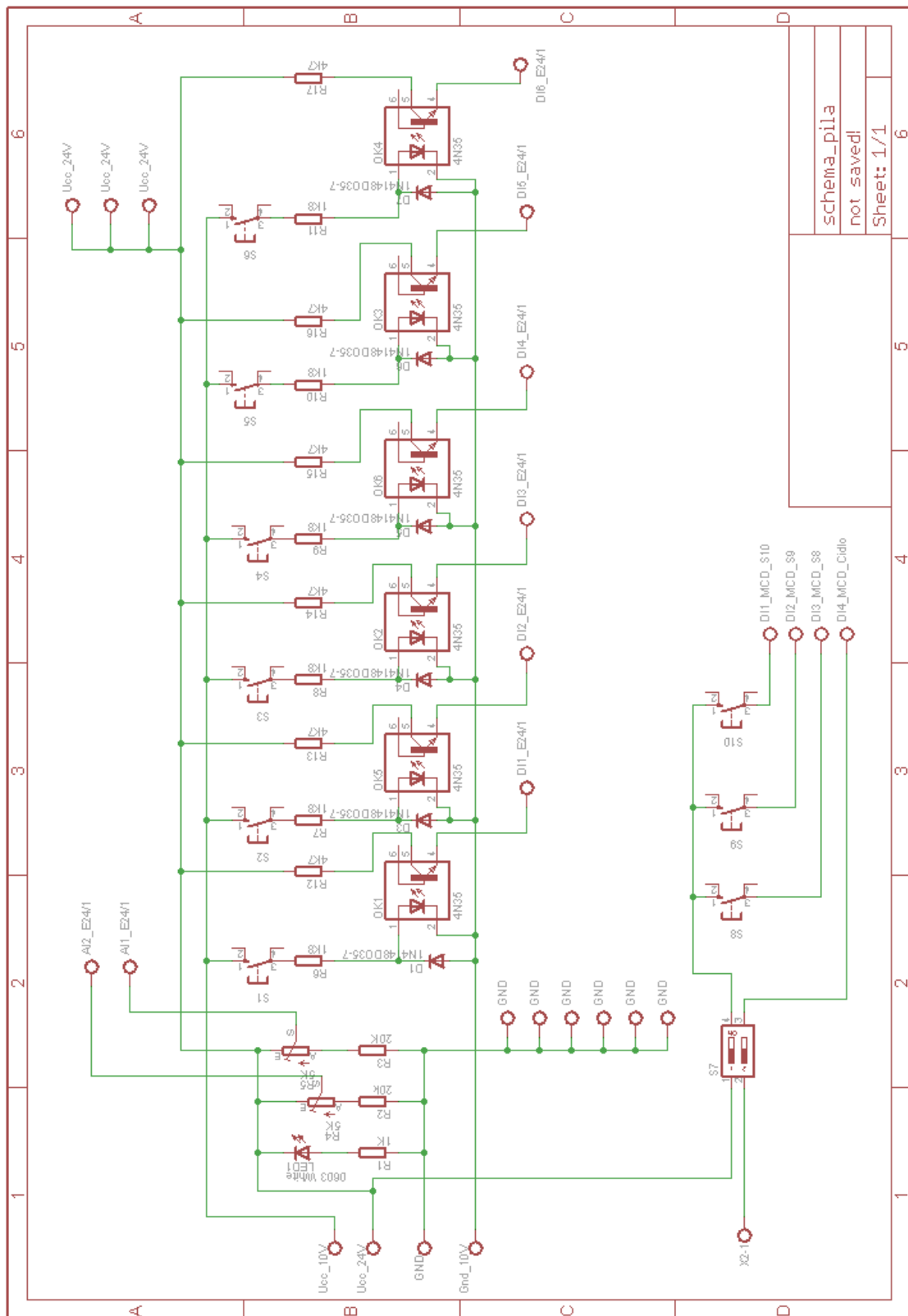
Text diplomové práce

Zdrojové soubory desky plošného spoje – ovládací panel

Řídící program

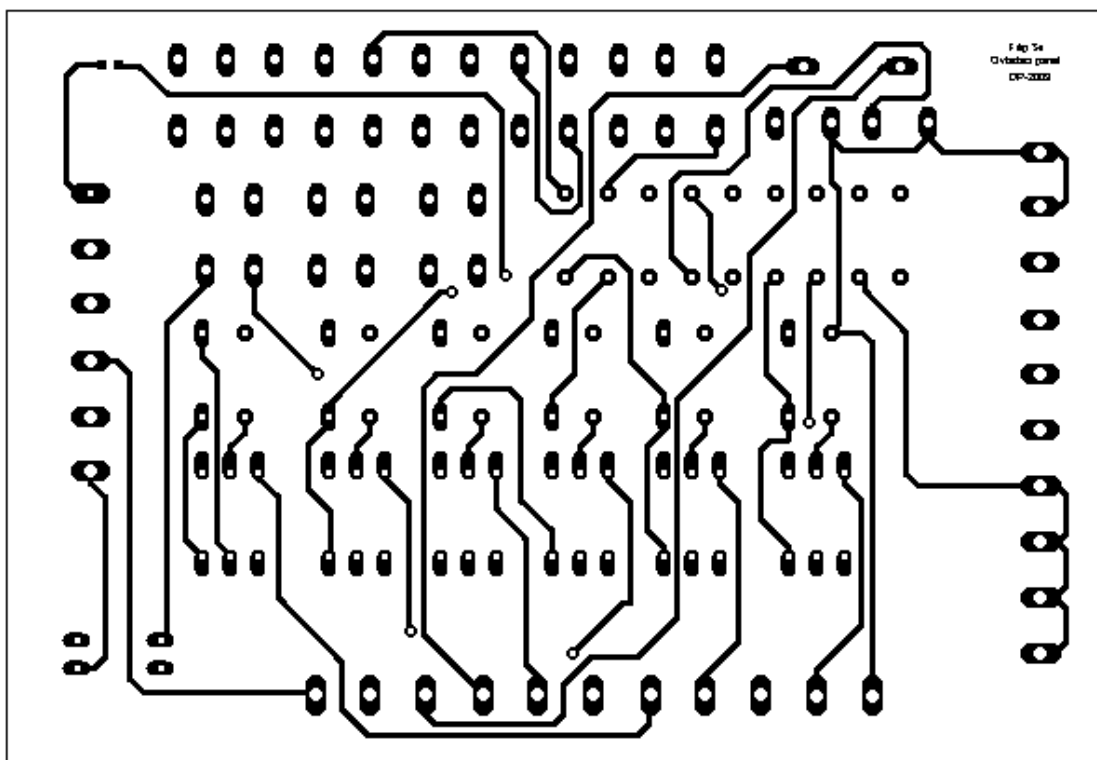
## Příloha 1

### Deska plošného spoje - Schéma zapojení ovládacího panelu

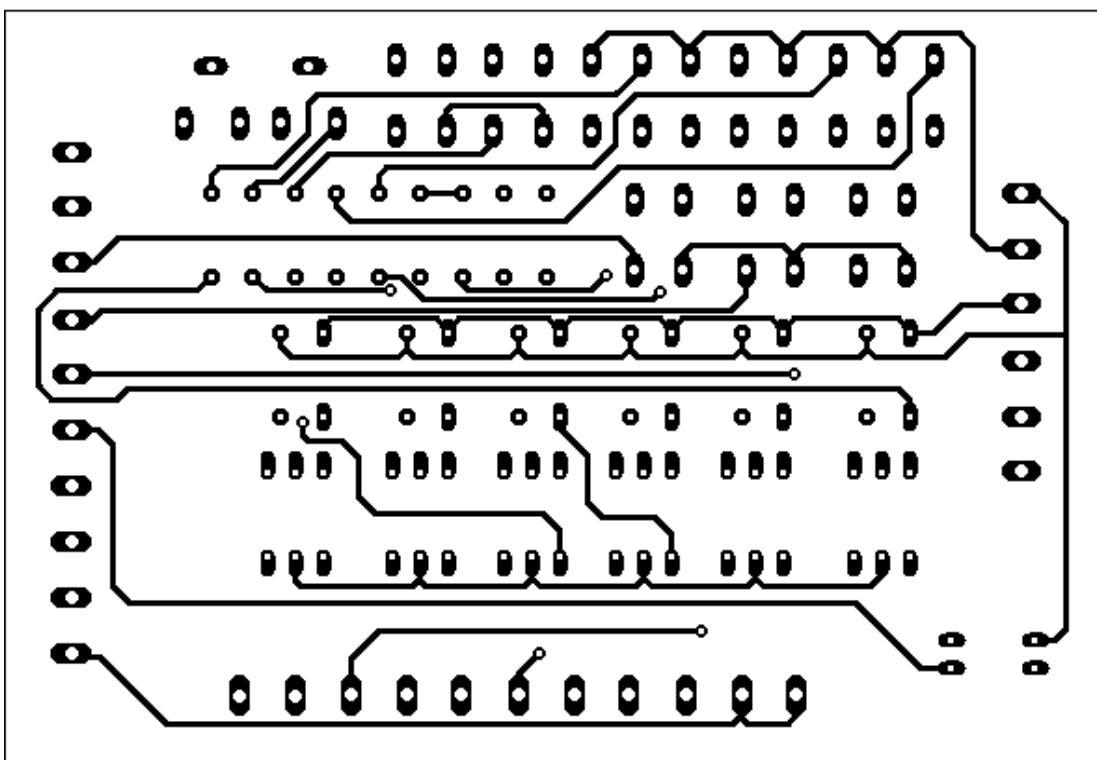


## Příloha 2

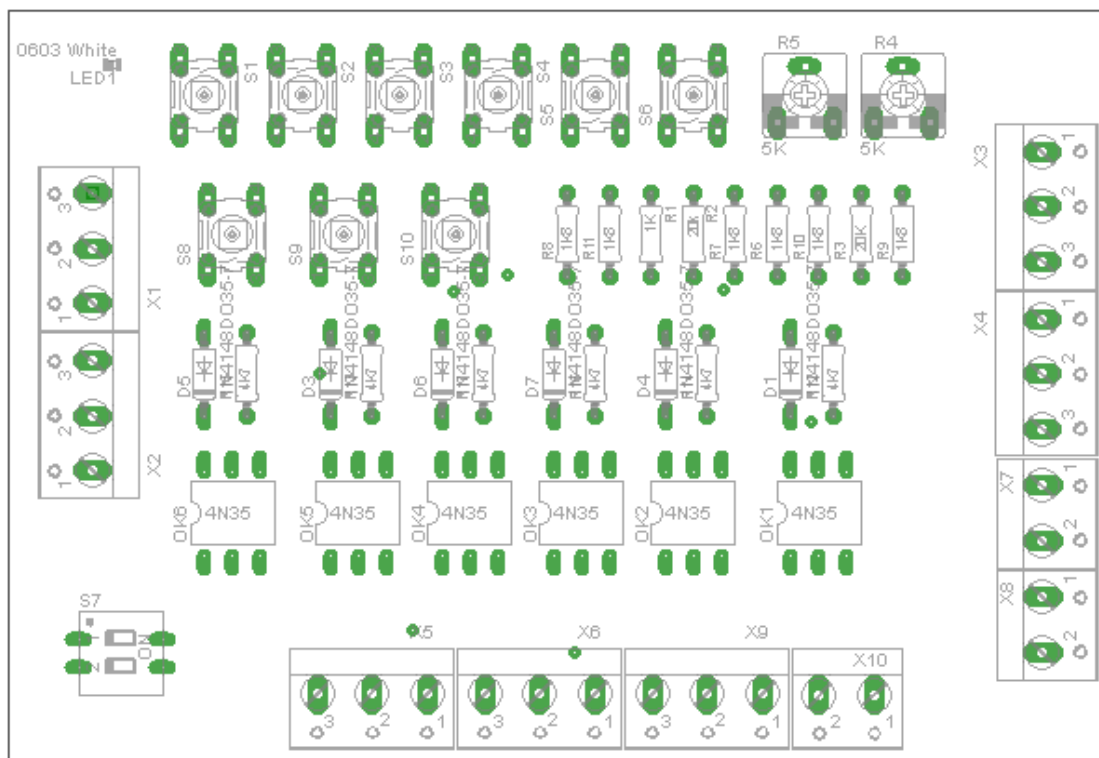
Deska plošného spoje – ovládací panel



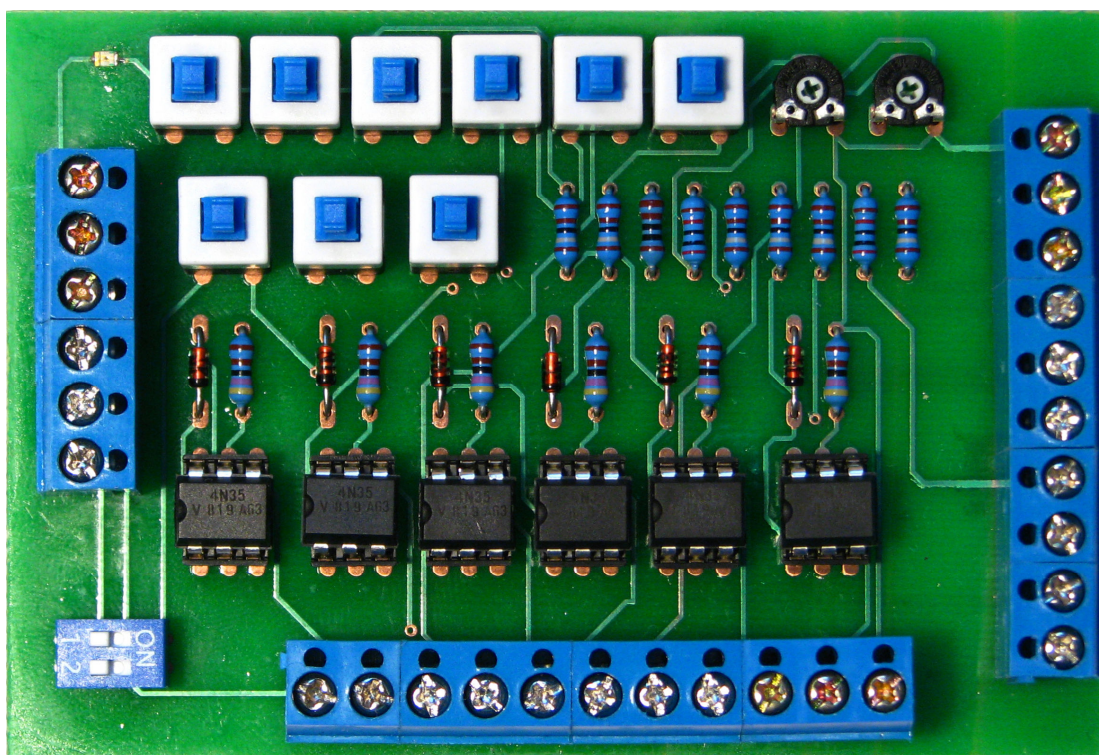
Strana Top



Strana Bottom



Osazovací schéma – strana Top



### Příloha 3


#### Seznam součástek – Ovládací panel

<i>Seznam součástek:</i>				
#	<i>Součástka</i>	<i>Hodnota [ <math>\Omega</math> ]</i>	<i>Počet kusů</i>	<i>Umístění ve schématu</i>
1	Rezistor	2700	1	R1
2	Rezistor	20000	2	R2, R3
3	Trimr	5000	2	R4, R5
4	Rezistor	4700	6	R12, R13, R14, R15, R16, R17
5	Rezistor	1800	6	R6, R7, R8, R9, R10, R11
	<i>Součástka</i>	<i>Popis/číslo součástky</i>	<i>Počet kusů</i>	
6	Smd Led - bílá	0603	1	Led 1
7	Optočlen	4N35	6	OK1, OK2, OK3, OK4, OK5, OK6
8	DIL6 patice	6 nožiček	6	
9	Tlačítko	B3F-10	9	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S8, S9, S10
10	Svorkovnice	2- svorky	3	
11	Svorkovnice	3- svorky	7	
12	Dioda	1N4148	6	D1, D3, D4, D5, D6, D7
13	Switch	2- vstupy	1	S7

## Technické parametry – pohon MCD – motor EC-Max, převzato z [15], strana 179

## maxon EC-max

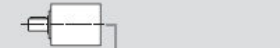



 Stock program  
 Standard program  
 Special program (on request)

Order Number

			272762	272763	272764	272765					
Motor Data											
Values at nominal voltage											
1	Nominal voltage	V	12.0	24.0	36.0	48.0					
2	No load speed	rpm	7990	9350	9500	9360					
3	No load current	mA	268	170	116	85.1					
4	Nominal speed	rpm	6630	8040	8260	8120					
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	62.4	61.3	64.7	65.3					
6	Nominal current (max. continuous current)	A	4.61	2.66	1.90	1.41					
7	Stall torque	mNm	381	458	522	519					
8	Starting current	A	26.8	18.8	14.5	10.7					
9	Max. efficiency	%	81	82	83	83					
Characteristics											
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	0.447	1.27	2.48	4.49					
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.0490	0.143	0.312	0.573					
12	Torque constant	mNm / A	14.2	24.3	35.9	48.6					
13	Speed constant	rpm / V	672	393	266	197					
14	Speed / torque gradient	rpm / mNm	21.2	20.6	18.4	18.2					
15	Mechanical time constant	ms	4.86	4.73	4.21	4.17					
16	Rotor inertia	acm²	21.9	21.9	21.9	21.9					

Specifications	Operating Range	Comments
17 Thermal data	n [rpm]	<div style="background-color: red; width: 20px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Continuous operation In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient. = Thermal limit.
18 Thermal resistance housing-ambient	7.4 K / W	
19 Thermal resistance winding-housing	0.5 K / W	<div style="background-color: white; width: 20px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Short term operation The motor may be briefly overloaded (recurring).
20 Thermal time constant winding	2.68 s	
21 Thermal time constant motor	1000 s	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Assigned power rating
22 Ambient temperature	-20 ... +100°C	
23 Max. permissible winding temperature	+155°C	
<b>Mechanical data (preloaded ball bearings)</b>		
24 Max. permissible speed	15000 rpm	
25 Axial play at axial load < 6.0 N	0 mm	
26 Axial play at axial load > 6.0 N	0.14 mm	
27 Radial play	preloaded	
28 Max. axial load (dynamic)	5.5 N	
29 Max. force for press fits (static)	100 N	
30 (static, shaft supported)	1300 N	
31 Max. radial loading, 5 mm from flange	25 N	

Other specifications			maxon Modular System		Overview on page 16 - 21					
29	Number of pole pairs	1		<b>Planetary Gearhead</b> Ø42 mm 3 - 15 Nm Page 245		<b>Encoder MR</b> 129 - 1000 CPT, 3 channels Page 258 <b>Encoder HEDL 5540</b> 500 CPT, 3 channels Page 266 <b>Brake AB 20</b> Ø20 mm 24 VDC, 0.1 Nm Page 306				
30	Number of phases	3								
31	Weight of motor	275 g								
Values listed in the table are nominal.										
<b>Connection Motor (Cable AWG 20)</b>										
red	Motor winding 1	Pin 1								
black	Motor winding 2	Pin 2								
white	Motor winding 3	Pin 3								
	N.C.	Pin 4								
<b>Connector Article number</b>										
Molex	39-01-2040									
<b>Connection Sensors (Cable AWG 26)</b>										
yellow	Hall sensor 1	Pin 1								
brown	Hall sensor 2	Pin 2								
grey	Hall sensor 3	Pin 3								
blue	GND	Pin 4								
green	V <sub>bat</sub> 4.5 ... 24 VDC	Pin 5								
	N.C.	Pin 6								
<b>Connector Article number</b>										
Molex	430-25-0600									
Wiring diagram for Hall sensors see page 27										
			<b>Recommended Electronics:</b> DECS 50/5 Page 284 DEC 50/5 285 DECV 50/5 286 DES 50/5 287 EPOS 24/5 294 EPOS2 50/5 295 EPOS P 24/5 297 Notes 20							

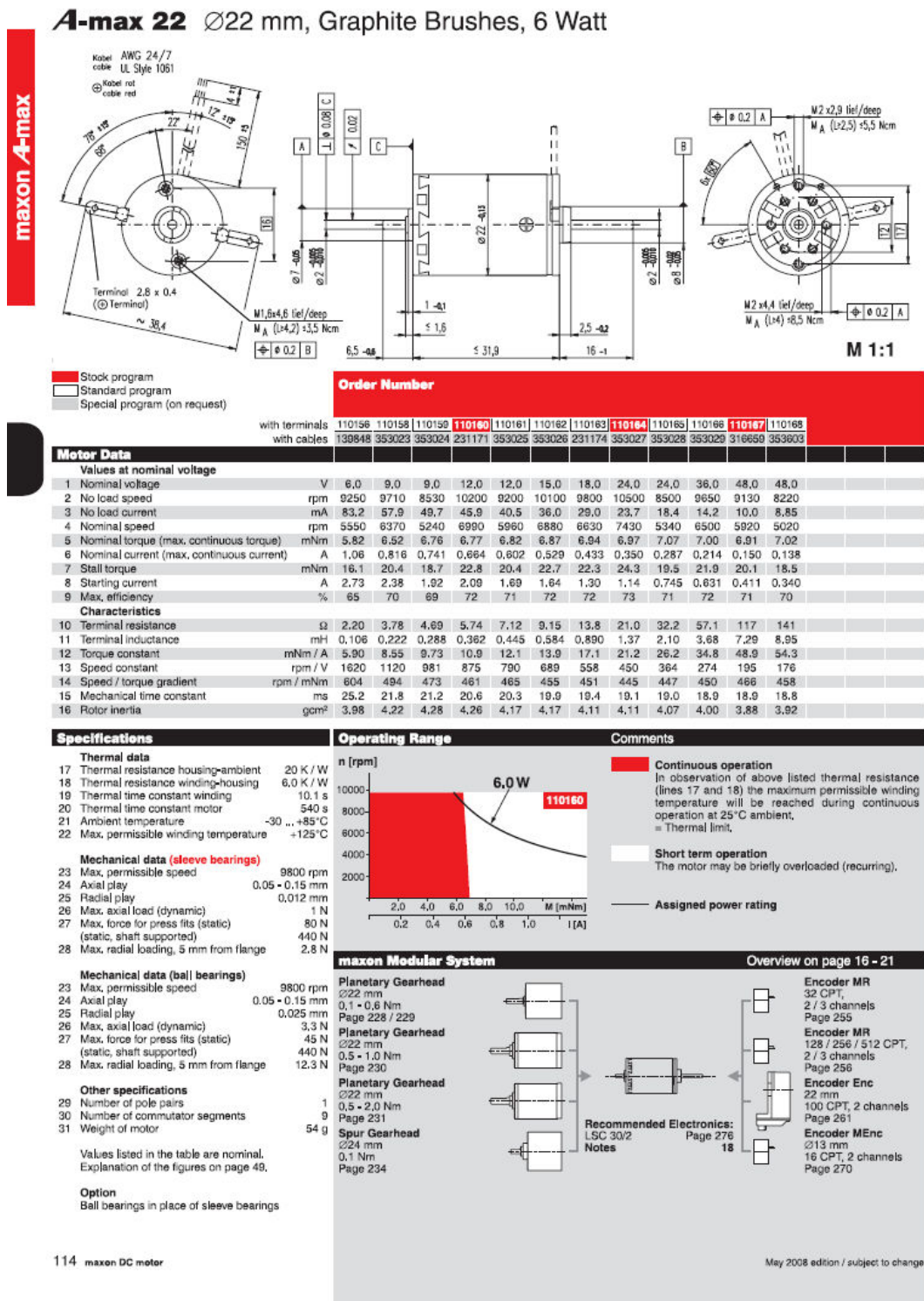
May 2008 edition / subject to change

maxon EC motor 179



## Příloha 5

Technické parametry – pohon A-Max, převzato z [15], strana 114



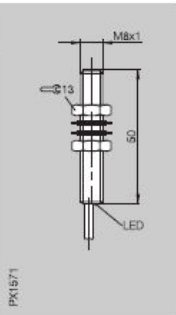


## Příloha 6

### Technické parametry – Indukční čidlo, převzato z [16]

Indukční snímače		DC 3-drát M8 S <sub>n</sub> 1,5 mm
Rozměry	<b>M8×1</b>	
Typ montáže (dvojele pokynů od strany 1.0.11)	vestavný	
Jmenovitá spínací vzdálenost S <sub>n</sub>	<b>1,5 mm</b>	
Zaručená spínací vzdálenost S <sub>s</sub>	0...1,2 mm	

CE






PNP	Spínací ① Rozpínací ②	BES M08MHPSC15B-BV02 BES M08MHPSC15B-BV02
NPN	Spínací ④ Rozpínací ⑤	BES M08MNSC15B-BV02

Jmenovité pracovní napětí U <sub>s</sub>	24 V DC
Napájecí napětí U <sub>s</sub>	12...30 V DC
Úbytek napětí U <sub>s</sub> při I <sub>s</sub>	≤ 2,5 V
Jmenovité izolační napětí U <sub>i</sub>	75 V DC
Jmenovitý pracovní proud I <sub>s</sub>	100 mA
Proud naprázdno I <sub>s</sub> max.	PNP ≤ 10 mA, NPN ≤ 18 mA
Zbytkový proud I <sub>r</sub>	≤ 80 μA
Ochrana proti přepólování	ano
Ochrana proti zkratu	ano
Připustná kapacita zátěže	≤ 0,5 μF
Opakovatelnost R	≤ 5 %
Provozní teplota okolí T <sub>s</sub>	-25...+70 °C
Spínací frekvence f	1000 Hz
Kategorie použití	DC 13
Indikace funkce	ano
Krytí podle IEC 60529	IP 67
Třída ochrany	
Materiál pouzdra	CuZn niklovaný
Materiál aktivní plochy	PA 12
Připojení	Kabel PVC 2 m
Počet vodičů × průřez vodičů	3×0,14 mm²
Certifikace	cULus
Doporučený konektor	

U snímačů s kabelem ostatní délky a materiál kabelu PUR na dotaz.

U snímačů s kabelem a konektorem ostatní délky na dotaz.



## Příloha 7

### Fotodokumentace zařízení

